

Département de géomatique appliquée  
Faculté des lettres et sciences humaines  
Université de Sherbrooke

**Évaluation de la précision de simulations du couvert neigeux par *SNOWPACK* à partir de données météorologiques in-situ et de prévision dans différents contextes climatiques des régions montagneuses canadiennes**

Kevin Côté

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences géographiques (M.Sc.),  
cheminement recherche en géomatique

Avril 2016

© Kevin Côté, 2016

## **Identification du jury**

### **Directeur de recherche :**

Dr. Alexandre Langlois, Professeur, Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et sciences humaines, Université de Sherbrooke

### **Membres du jury :**

Dr. Francis Gauthier, Professeur, Département de géographie, Université du Québec à Rimouski

Dr. Hardy Granberg, Professeur associé, Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et sciences humaines, Université de Sherbrooke

## Résumé du projet

Depuis les années 1990, environ 12 personnes par année sont tuées des suites d'une avalanche, ce qui en fait maintenant la principale cause de décès liés aux catastrophes hivernales au Canada (Stethem, 2003). Comme l'intérêt pour les activités de plein air telles que la randonnée, la motoneige et le ski de randonnée dans les régions éloignées augmente, l'amélioration de la prévision des avalanches à l'échelle régionale est nécessaire afin d'assurer la sécurité des usagers de l'arrière-pays. La logistique et les mesures de sécurité étant importantes lors de déplacements dans l'arrière-pays, les observations du couvert neigeux (observations d'avalanches, profils stratigraphiques et tests de stabilité) en terrain avalancheux ne sont pas toujours possibles pour les praticiens et prévisionnistes du milieu. Une alternative intéressante est d'analyser le manteau neigeux à distance en utilisant les sorties de modèles physiques de simulation du couvert neigeux. *SNOWPACK*, un modèle développé par l'Institut WSL sur la neige et les avalanches (SLF) en Suisse, est actuellement utilisé de manière opérationnelle pour la prévision d'avalanches et la recherche dans les Alpes suisses. Le projet vise à adapter *SNOWPACK* aux différentes conditions météorologiques dans les montagnes canadiennes (climat parfois côtier, transitionnel ou continental) et à l'utiliser dans le contexte de gestion de la prévention d'avalanches d'Avalanche Canada afin d'améliorer les prévisions à l'échelle régionale de la stabilité du couvert neigeux. Ce mémoire présente les traitements et analyses qui ont été menés pour évaluer le potentiel d'utilisation du modèle *SNOWPACK* forcé à la fois avec des données météorologiques in-situ et des données météorologiques de réanalyses. La validation des données de réanalyses avec les données in-situ pour les hivers de 2013-2014 et de 2014-2015 montre que le modèle météorologique GEM-LAM (*Global Environmental Multiscale Limited Area Model*) du Centre Météorologique Canadien (CMC) est le plus précis pour les trois contextes climatiques du projet. Un biais sur les données de précipitation proportionnel à l'intensité de celles-ci a toutefois également été identifié. Les sorties des simulations forcées avec GEM-LAM sont les plus proches des mesures observées sur le terrain en ce qui a trait aux indices de densité et de température relative moyenne, montrant des  $R^2$  supérieurs et des valeurs de RMSE plus faibles. Finalement, l'analyse qualitative de la présence de couches faibles persistantes à l'aide de la plate-forme InfoEX d'Avalanche Canada montre un accord entre les dates de formation de croûte de regel et de givre de surface et les sorties du modèle *SNOWPACK*, confirmant son potentiel pour une adaptation canadienne.

## Project Abstract

Since the 1990s, approximately 12 people per year are killed on average by avalanches, which are now the primary cause of death related to winter disasters in Canada (Stethem, 2003). As interest in outdoor activities, such as hiking, sledding and ski touring, in remote areas is increasing, there is a strong need for improved avalanche forecasting at the regional scale. Due to important logistical and safety matters, avalanche terrain measurements are not always possible for practitioners/forecasters (avalanche observations, *snowpack* profiles and stability tests). An interesting alternative is to analyze the *snowpack* without these challenges by using multilayered snow model outputs. *SNOWPACK*, a model developed by the WSL Institute for Snow and Avalanche Research (SLF) in Switzerland, is currently used operationally for avalanche prediction and research (Lehning, 1999) in the Swiss Alps. This project aims to improve large-scale predictions of snow stability and avalanches in a Canadian context using *SNOWPACK*. Thus, this document presents the analyses that have been conducted to assess the potential of using *SNOWPACK* driven with both in-situ and forecasted meteorological data. A comparison of meteorological data from in-situ and predicted datasets for the winters of 2013-2014 and 2014-2015 shows that the GEM-LAM model is the most accurate for the three climatic contexts in this project, but also showed a precipitation bias proportional to its intensity/rate. Snow simulations forced with GEM-LAM are the closest to field measurements, showing a higher  $R^2$  and lower RMSE values. Finally, predictions of persistent weak layers have also been validated using the *InfoEx* platform from Avalanche Canada. Crust and surface hoar formation dates simulated by *SNOWPACK* agree with the information reported in *InfoEx* highlighting the potential for a Canadian implementation.



## Table des matières

Résumé du projet.....	iii
Project Abstract.....	iv
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	vii
Remerciements.....	viii
1. Introduction.....	1
1.1 Problématique et mise en contexte.....	1
1.2 Objectifs.....	2
1.3 Hypothèses.....	3
2. Cadre théorique.....	4
2.1 Types de climat en régions montagneuses.....	4
2.2 Types d'avalanche et facteurs de déclenchement.....	6
2.3 Méthodes « traditionnelles » de prévision d'avalanches.....	10
2.4 Modèles numériques de simulation de couvert neigeux.....	11
3. Cadre expérimental.....	14
3.1 Zones d'étude.....	14
3.1.1 Mont Fidelity, Parc National des Glaciers, Colombie-Britannique, Canada.....	14
3.1.2 Marmot Basin, Parc National de Jasper, Alberta, Canada.....	15
3.1.3 Monts Chic-Chocs, Parc National de la Gaspésie, Québec, Canada.....	15
3.2 Données du projet.....	15
3.2.1 Données météorologiques.....	15
3.2.2 Données de validation in-situ.....	17
3.3 Méthodologie.....	18
3.3.1 Extraction et conversion des données météorologiques.....	19
3.3.2 Validation des données météorologiques de prévision.....	19
3.3.3 Simulations <i>SNOWPACK</i> .....	20
3.3.4 Évaluation de la précision des simulations.....	20
4. Présentation et analyse des résultats.....	23
4.4 Validation des données météorologiques.....	23
4.4.1 Mont Fidelity.....	23
4.4.2 Marmot Basin.....	26
4.4.3 Chic-Chocs.....	27
4.4.4 Sommaire.....	29
4.5 Simulations <i>SNOWPACK</i> .....	30
4.5.1 Évaluation de la précision des simulations.....	31
5. Discussion.....	47
5.1 Discussion sur les résultats des simulations.....	47
5.2 Recommandations.....	47
6. Conclusion.....	49
Références.....	51
Annexe.....	57
Annexe 1 – Carte du site d'étude du Mont Fidelity, Parc National des Glaciers, C.-B. ....	57
Annexe 2 – Carte du site d'étude de Marmot Basin, Parc National de Jasper, Alberta. ....	58
Annexe 3 – Carte du site d'étude des Monts Chic-Chocs, Parc National de la Gaspésie, Québec.....	59
Annexe 4 – Article scientifique soumis à la revue <i>Physical Geography</i> .....	60

## Liste des figures

<b>Figure 1.</b> Coupe verticale et longitudinale du sud de la Colombie-Britannique (tiré de Chilton, 1981).....	5
<b>Figure 2.</b> Composantes d'une avalanche (source : <a href="http://meted.ucar.edu">http://meted.ucar.edu</a> ).....	9
<b>Figure 3.</b> Emplacement des sites d'études du projet. (A) Mont Fidelity, Parc National des Glaciers, Colombie-Britannique. (B) Marmot Basin, Parc National de Jasper, Alberta. (C) Monts Chic-Chocs, Parc National de la Gaspésie, Québec. (Source : Google Maps).....	14
<b>Figure 4.</b> Schéma méthodologique du projet.....	18
<b>Figure 5.</b> Évaluation du biais (données modélisées - données observées) pour la variable d'intensité de précipitation pour les hivers 2013-2014 et 2014-2015 au site d'étude du Mont Fidelity.....	25
<b>Figure 6.</b> Évaluation du biais (données modélisées - données observées) pour la variable d'intensité de précipitation pour l'hiver 2013-2014 au site d'étude de Marmot Basin.....	27
<b>Figure 7.</b> Évaluation du biais (données modélisées - données observées) pour la variable d'intensité de précipitation pour les hivers 2013-2014 et 2014-2015 au site d'étude des monts Chic-Chocs.....	29
<b>Figure 8.</b> Analyse des hauteurs de neige simulées par rapport aux données observées pour l'hiver 2013-2014 au site d'étude du Mont Fidelity.....	31
<b>Figure 9.</b> Analyse des hauteurs de neige simulées par rapport aux données observées pour l'hiver 2014-2015 au site d'étude du Mont Fidelity.....	32
<b>Figure 10.</b> Analyse des hauteurs de neige simulées par rapport aux données observées pour l'hiver 2013-2014 au site d'étude CAELA des monts Chic-Chocs. ....	33
<b>Figure 11.</b> Analyse des hauteurs de neige simulées par rapport aux données observées pour l'hiver 2014-2015 au site d'étude des monts Chic-Chocs.....	34
<b>Figure 12.</b> Analyse de la densité relative moyenne pour les hivers 2013-2014 et 2014-2015 au site d'étude du Mont Fidelity. (a) données in-situ, (b) données GEM-LAM, (c) données GEM15, (d) données GEM10 .....	35
<b>Figure 13.</b> Analyse de la température relative moyenne pour les hivers 2013-2014 et 2014-2015 au site d'étude du Mont Fidelity. (a) données in-situ, (b) données GEM-LAM, (c) données GEM15, (d) données GEM10 .....	38
<b>Figure 14.</b> Analyse de la température relative moyenne pour les hivers 2013-2014 et 2014-2015 au site d'étude des monts Chic-Chocs. (a) données in-situ, (b) données GEM-LAM, (c) données GEM15, (d) données GEM10.....	39
<b>Figure 15.</b> Sortie <i>SNOWPACK</i> de types de grain de neige et de taille de lien entre eux pour l'hiver 2014-2015 au site d'étude du Mont Fidelity.....	42
<b>Figure 16.</b> Sortie <i>SNOWPACK</i> de types de grain de neige et de taille de lien entre eux pour l'hiver 2014-2015 au site d'étude des monts Chic-Chocs.....	44
<b>Figure 17.</b> Profils stratigraphiques récoltés au site d'étude des monts Chic-Chocs durant le mois de janvier 2015.....	45
<b>Figure 18.</b> Sortie <i>SNOWPACK</i> de types de grain de neige extrait à la fin du mois de janvier (25 janvier 2015) pour le site d'étude des monts Chic-Chocs. ....	46
<b>Figure 19.</b> Carte du site d'étude du Mont Fidelity, Parc National des Glaciers, Colombie-Britannique (source des données géographiques : Géogratis.ca). ....	57
<b>Figure 20.</b> Carte du site d'étude de Marmot Basin, Parc National de Jasper, Alberta (source des données géographiques : Géogratis.ca). ....	58
<b>Figure 21.</b> Carte du site d'étude des Monts Chic-Chocs, Parc National de la Gaspésie, Québec (source des données géographiques : Géogratis.ca). ....	59

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.</b> Caractéristiques propres aux différents types d'avalanches .....	8
<b>Tableau 2.</b> Stations météorologiques automatiques du projet et variables mesurées .....	16
<b>Tableau 3.</b> Nombre de profils d'observation par hiver, par site d'étude .....	17
<b>Tableau 4.</b> Intervalles temporels utilisés pour la validation des données météorologiques.....	19
<b>Tableau 5.</b> Paramètres statistiques des nuages de points issus de la comparaison entre données météorologiques modélisées et observées pour l'hiver 2013-2014 au site d'étude du Mont Fidelity (souligné: meilleure valeur parmi les 3 modèles météorologique).....	23
<b>Tableau 6.</b> Paramètres statistiques des nuages de points issus de la comparaison entre données météorologiques modélisées et observées pour l'hiver 2014-2015 au site d'étude du Mont Fidelity (souligné: meilleure valeur parmi les 3 modèles météorologique).....	24
<b>Tableau 7.</b> Paramètres statistiques des nuages de points issus de la comparaison entre données météorologiques modélisées et observées pour l'hiver 2013-2014 au site d'étude de Marmot Basin (souligné: meilleure valeur parmi les 3 modèles météorologique). ....	26
<b>Tableau 8.</b> Paramètres statistiques des nuages de points issus de la comparaison entre données météorologiques modélisées et observées pour l'hiver 2013-2014 au site d'étude des monts Chic-Chocs (souligné: meilleure valeur parmi les 3 modèles météorologique). ....	28
<b>Tableau 9.</b> Paramètres statistiques des nuages de points issus de la comparaison entre données météorologiques modélisées et observées pour l'hiver 2014-2015 au site d'étude des monts Chic-Chocs (souligné: meilleure valeur parmi les 3 modèles météorologique). ....	28
<b>Tableau 10.</b> Sommaire des performances des modèles météorologiques : hiver 2013-2014 .....	29
<b>Tableau 11.</b> Sommaire des performances des modèles météorologiques : hiver 2014-2015 .....	30
<b>Tableau 12.</b> Paramètres statistiques associés aux nuages de points de l'analyse de la densité relative moyenne 2013-2015 au site d'étude du Mont Fidelity. ....	36
<b>Tableau 13.</b> Paramètres statistiques associés aux nuages de points de l'analyse de la température relative moyenne 2013-2015 au site d'étude du Mont Fidelity. ....	38
<b>Tableau 14.</b> Paramètres statistiques associés aux nuages de points de l'analyse de la température relative moyenne 2013-2015 au site d'étude des monts Chic-Chocs.....	39
<b>Tableau 15.</b> Paramètres statistiques associés aux nuages de points de l'analyse de la température relative moyenne (sans les profils sur talus rocheux) 2013-2015 au site d'étude des monts Chic-Chocs.....	40
<b>Tableau 16.</b> Présentation des événements de pluie en début de saison au site d'étude du Mont Fidelity pour l'hiver 2014-2015.....	41
<b>Tableau 17.</b> Présentation des événements de pluie en début de saison au site d'étude des monts Chic-Chocs pour l'hiver 2014-2015. ....	43

## Remerciements

Je veux tout d’abord remercier mon directeur de recherche, M. Alexandre Langlois, de m’avoir permis de participer à ce projet. Son support et ses conseils, autant au niveau de la gestion d’un projet de recherche que de la science en elle-même m’a été d’une aide considérable.

J’aimerais remercier nos partenaires qui ont été d’une aide et d’une flexibilité exceptionnelles afin d’assurer le succès de nos manipulations sur le terrain : Dominique Boucher, Julie Leblanc et Laurent Janssen et Jean-Pierre Gagnon d’Avalanche Québec, la SÉPAQ, Simon Horton, Michael Shirmer, Deanna Anderson et Bruce Jamieson du groupe de recherche ASARC de l’Université de Calgary, Steve Blake et Jeff Goodrich de Parcs Canada et Kerry MacDonald du Marmot Basin Ski Resort.

J’aimerais également remercier les organismes ayant contribué financièrement à la réalisation de ce projet, soit le Fonds des nouvelles initiatives de recherche et sauvetage du Gouvernement du Canada (*SAR-NIF*), le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (*NSERC*) et le Centre d’Études Nordiques (*CEN*).

Finalement, j’aimerais remercier ma famille, mes amis et mes collègues de m’avoir offert support, encadrement et encouragements tout au long des deux années de la réalisation de ce projet et d’avoir fait de ce cheminement une expérience de vie m’ayant aidé à grandir autant personnellement que professionnellement.

# 1. Introduction

## 1.1 Problématique et mise en contexte

Chaque année, on évalue à environ 1,5 million le nombre d'avalanches qui surviennent au Canada. De ce nombre, approximativement 5% surviennent à des endroits accessibles par les amateurs de plein air (Stethem, 2003), ce qui fait de ce type de géorisque le plus dangereux en période hivernale. En effet, depuis les années 1990, 12 personnes en moyenne meurent chaque année de cette cause (*Ibid*, 2003). Les études sur la compréhension des causes de ce type de catastrophe naturelle et sur les moyens d'assurer une meilleure prévision et gestion de risque se multiplient (Horton, 2014; Schirmer, 2015; Schweizer, 2015). Le relief des régions montagneuses canadiennes étant variable, l'évaluation générale de la stabilité du couvert neigeux se voit affectée par les effets locaux des conditions météorologiques. La ponctualité des observations des techniciens en avalanche pose une limite majeure au niveau de la fiabilité de l'information extraite et partagée aux usagers sous forme de bulletins. L'observation de la stratigraphie du couvert neigeux et la réalisation de tests de compression et de propagation sont des mesures qui ont été prouvées efficaces (CAA, 2007), mais qui peuvent s'avérer inconstantes lors de mesures succinctes dans un même environnement. De plus, les exigences logistiques majeures (transport d'équipement et déplacements en terrain avalancheux) que nécessitent de telles mesures posent une limite aux techniciens et prévisionnistes. Ces derniers utilisent également des données de stations météorologiques automatiques comme source d'information pour la production des bulletins d'information à l'attention des usagers des parcs. Toutefois, la présence de ces stations est encore assez rare en haute altitude et ne peut assurer une représentation fidèle de toute l'étendue de terrain accessible aux amateurs de plein air hivernal (Schirmer et al, 2015; 2010).

Le couplage de modèles de simulation du couvert neigeux et de données de stations météorologiques automatiques est une alternative de plus en plus explorée par les scientifiques et intervenants du milieu (Bellaire, 2011). Dans ce contexte, les principaux modèles utilisés à ce jour sont *SNOWPACK* (Bartelt & Lehning, 2002; Lehning *et al.*, 2002a, 2002b) et *CROCUS* (Brun *et al.*, 1992). Le modèle *CROCUS* fut le premier modèle numérique à simuler le métamorphisme et la stratigraphie du couvert neigeux (Brun *et al.*, 1989) et rendit possible pour la première fois le suivi en temps réel de conditions de neige simulées en milieu alpin (Durand *et al.*, 1999). Le modèle *SNOWPACK* simule quant à lui ponctuellement le couvert neigeux aux

stations météorologiques, puis caractérise la force et la résistance de chacune des couches en fonction de ses propriétés physiques (Schweizer *et al.*, 2006). Le modèle *SNOWPACK* est d'ailleurs utilisé opérationnellement depuis l'hiver 1997-1998 dans les régions alpines suisses sur un réseau de stations météorologiques (Lehning, 1999).

La faible densité de stations météorologiques automatiques en montagne étant toutefois une limite logistique et opérationnelle, l'utilisation de ces modèles ramène le même problème de non-représentativité de la variabilité spatiale climatique et géologique en régions montagneuses canadiennes. L'amélioration de la précision et de la résolution spatiale de données de réanalyses météorologiques permet actuellement aux scientifiques et intervenants de miser sur une source de données externe offrant une représentativité spatiale améliorée en ce qui concerne les milieux isolés. La combinaison de ce type de données avec un modèle de simulation du couvert neigeux comme *SNOWPACK* permet d'obtenir de l'information sur la structure du couvert neigeux sans avoir à confronter les contraintes logistiques, opérationnelles et spatiales énumérées précédemment. Cette combinaison est donc de plus en plus explorée par les professionnels du milieu et se veut être un complément efficace aux opérations terrain classiques.

## **1.2 Objectifs**

L'objectif général de la démarche est d'évaluer le potentiel de simulations numériques du couvert neigeux par le modèle *SNOWPACK* dans une optique d'évaluation du risque d'avalanche afin d'aider à la prise de décision relative à la sécurité en région montagneuse canadienne.

Pour atteindre cet objectif, trois objectifs secondaires sont définis :

1. Évaluer la précision des données météorologiques de réanalyses GEM15, GEM10 et GEM-LAM dans différents contextes climatiques de régions montagneuses canadiennes;
2. Évaluer la performance du modèle *SNOWPACK* lorsqu'utilisé avec des données de stations météorologiques automatiques et de données météorologiques de réanalyses GEM;
3. Valider les sorties de densité, température et structure du couvert neigeux du modèle à l'aide de données acquises sur le terrain.

### 1.3 Hypothèses

Le projet se base sur les deux hypothèses suivantes :

1. Les données de réanalyses météorologiques du Centre Météorologique Canadien (CMC) GEM-LAM (résolution de 2,5km) offriront une alternative efficace et assez précise aux données de stations météorologiques automatiques afin de pouvoir être utilisées comme intrant à *SNOWPACK* dans différents contextes climatiques des régions montagneuses canadiennes (Schirmer *et al.*, 2015);
2. Les sorties importantes du modèle *SNOWPACK* pour l'évaluation de la stabilité du couvert neigeux présenteront une précision suffisante pour évaluer adéquatement la structure du couvert neigeux afin d'appuyer les décideurs en prévention d'avalanche (Monti, 2012).

## **2. Cadre théorique**

### **2.1 Types de climat en régions montagneuses**

La première classification du climat des régions montagneuses d'Amérique du Nord fut réalisée par André Roch, un scientifique de l'Institut Fédéral suisse de Recherche sur la neige et les avalanches, en 1949 (Hägeli et McClung, 2003). Roch (1949) classa les régions montagneuses de l'ouest américain dans trois catégories : le climat humide le long de la côte, le climat sec plus à l'est de la côte (climat continental) et finalement un climat nommé « Rocky Mountains climate ». Lachapelle (1966) associa ensuite chacun de ces types de climat avec le type de couvert neigeux qu'on peut y retrouver et les risques d'avalanches associés. Il identifia quatre types de climat aux caractéristiques différentes : le climat côtier, le climat côtier transitionnel, le « Rocky Mountains climate » et le « intermountain climate ». Le couvert neigeux du climat côtier est caractérisé par de fortes précipitations de neiges et des températures douces. Bien que les accumulations importantes de neige puissent provoquer de l'instabilité dans le couvert neigeux, il jugea que les températures douces favorisaient quant à elle sa stabilisation. Ce type de climat présente également des épisodes de pluies fréquents pouvant provoquer des cycles d'avalanches de neige mouillée. Les montagnes s'y trouvant culminent habituellement à des altitudes inférieures à 2500m et les précipitations totales peuvent aller jusqu'à 25m par hiver (Lachapelle, 1966). Le « Rocky Mountains climate » se situe dans les régions montagneuses de 2500m à 4000m d'altitude. Des vents forts et des températures très froides caractérisent ce type de climat. Le transport de neige est très important et est une cause majeure de la présence d'instabilité sur les pentes qui reçoivent la neige, tout comme la formation de givre de profondeur qui est proportionnel au gradient de température. Le « intermountain climate » est situé entre les Rocheuses et la zone côtière dans les régions montagneuses de 2000m à 3000m d'altitude et est un mélange des deux climats précédemment. Les précipitations totales durant l'hiver varient entre 7m et 15m et les températures sont plus douces que celles du « Rocky Mountains climate » avec quelques épisodes de pluies par saison. De plus, l'influence des climats continentaux et « Rocky Mountains » varie significativement d'année en année ce qui en fait un climat où les tendances sont difficiles à cerner (Hägeli et McClung, 2003). Le dernier climat présenté par Lachapelle (1966), le continental transitionnel («coastal transitional zone») est quant à lui caractérisé par des températures froides et des précipitations importantes, bien que plus faibles que le climat côtier.



Le couvert neigeux est parfois mince et peut être instable selon les propriétés structurales des couches qui y sont présentes.

Mock et Birkeland (2000) ont plus tard réalisé une procédure de classification des climats en région montagneuse basée seulement sur les paramètres météorologiques mesurés en montagnes. Le résultat de cette étude confirma la classification des climats de Lachapelle (1966) et la distribution spatiale de ceux-ci. McClung et Schaerer (1993) ont quant à eux classifié les régions montagneuses canadiennes en se basant sur les paramètres de Lachapelle (1966). Ils ont fusionné le « intermountain climate » et le « coastal transitionnal climate » en un climat nommé transitionnel afin de mieux décrire la région intermédiaire entre le climat côtier et le « Rocky Mountains climate ». Ils ont ainsi attribué le climat côtier aux régions montagneuses près de la côte, le climat continental aux montagnes Rocheuses canadiennes et le climat transitionnel aux montagnes de la chaîne de Columbia. La figure 1 résume le parcours qu'une masse d'air océanique prend lorsqu'elle se dirige vers l'intérieur des terres canadiennes.

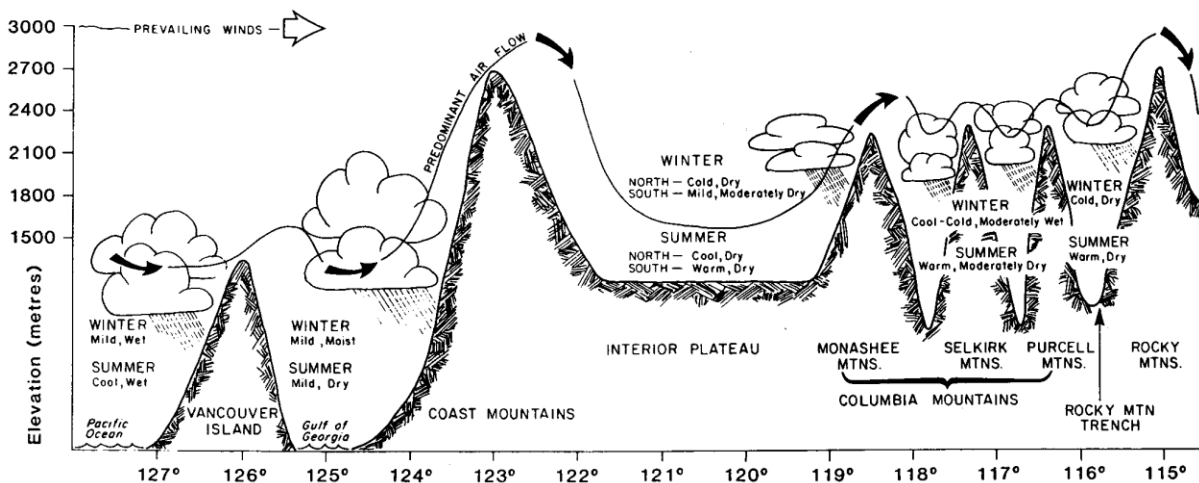


Figure 1. Coupe verticale et longitudinale du sud de la Colombie-Britannique (tiré de Chilton, 1981)

Au Québec, la zone d'intérêt abordée dans ce mémoire est la région occupée par les monts Chic-Chocs. Cette région peut être classifiée comme ayant un climat continental humide avec influence maritime de par sa proximité avec le fleuve et le golfe Saint-Laurent (Gagnon, 1970; Fortin et Hétu, 2009). Le tableau 1 présente les moyennes enregistrées en hiver près de la côte (Ste-Anne-des-Monts) et plus à l'intérieure de la péninsule gaspésienne (Cap-Seize).

Tableau 1. Moyennes hivernales pendant la période 1970-2000 (tiré de Hétu et Fortin, 2009)

Localisation / Variables	Ste-Anne-des-Monts (49°08'N, 66°28'O, Alt. 15 m.)					Cap-Seize (49°01'N, 66°24'O, Alt. 229 m.)				
	D	J	F	M	A	D	J	F	M	A
Température moyenne	-7,4	-11,7	-10,6	-5	1,3	-10,1	-14,3	-12,8	-6,5	0,9
Température minimale	-3,8	-7,4	-6,3	-0,9	5	-5,5	-9	-7,6	-1,3	5,5
Température maximale	-10,9	-16	-14,8	-9,2	-2,3	-14,6	-19,6	-17,9	-11,6	-3,8
Précipitation tot. (mm)*	68,7	57,1	43,9	57,6	55,6	124,8	101	78,1	92,2	74,1
Précipitation pluie (mm)	16,1	7,7	4,6	11,2	36,4	15,9	13,6	7,3	14,7	35,5
Précipitation neige (cm)	52,6	49,3	39,3	46,4	19,2	110,8	88,7	71,8	79,7	38,7

\* Équivalent en eau (EE)

Source : Environnement Canada, 2009.

Le climat des Chic-Chocs est fréquemment soumis à des événements météorologiques extrêmes au courant de l'hiver. La structure résultante du manteau neigeux suit habituellement ces événements et est donc composée d'une succession de couches aux propriétés différentes. L'épaisseur du manteau neigeux varie entre 50cm et 170cm mais peut parfois atteindre plus de 300cm (Hétu et Fortin, 2009). Ce type de climat favorise donc la probabilité de création de couches fragiles dans le manteau neigeux et conséquemment le déclenchement d'avalanches.

## 2.2 Types d'avalanche et facteurs de déclenchement

Les avalanches sont décrites comme étant la conséquence d'une faiblesse structurale dans le couvert neigeux, celles-ci étant principalement influencées par les conditions météorologiques qui prévalent (Lachapelle, 1966). Le type d'avalanche déclenché dépend de la cohésion des grains de neige dans le couvert neigeux dit instable (Jamieson et Johnston, 1992). Le manteau neigeux est quant à lui composé de plusieurs couches aux propriétés différentes et formées par les variations de température, de pression atmosphérique et du couvert neigeux, de vent et d'humidité avant, durant et après les événements de précipitations de neige (CAA, s.d.). La radiation solaire (Horton *et al.*, 2014) et les événements de pluie sur neige (Dolant *et al.*, 2016) sont également des éléments importants dans les processus de métamorphose du couvert neigeux pouvant affecter sa stabilité. Dans un contexte de formation d'avalanches, ces processus incluent principalement les changements dus aux flux de chaleur et les changements dus à la pression exercée par le poids des couches supérieures du couvert neigeux (McClung et Schaerer, 2006). Durant la saison où les risques d'avalanches sont les plus grands, le métamorphisme des cristaux de neige dû aux flux de chaleur (métamorphisme de gradient de température) prédomine sur le métamorphisme dû à la pression du couvert neigeux. Ce dernier processus est dominant lorsque

la densité de la neige est au-dessus de la moyenne de la neige saisonnière, comme on retrouve par exemple dans un couvert neigeux sur un glacier (*Ibid*, 2006).

Avalanche Canada recense huit types d'avalanches aux propriétés différentes (CAA, s.d.). Le tableau-2 introduit ceux-ci avec les propriétés structurelles et facteurs de déclenchement importants les régissant.

**Tableau 2. Caractéristiques propres aux différents types d'avalanches**

Type d'avalanche	Propriétés
Avalanche de neige <u>sèche sans cohésion</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Couches de neige de surface (poudreuse);</li> <li>• Zone de départ est un point précis souvent près d'une structure rocheuse sur pente raide (<math>&gt; 35^\circ</math>);</li> <li>• Avalanche s'élargit au fil de sa descente;</li> <li>• Fréquente à haute altitude lorsque des précipitations tombent sur une croûte.</li> </ul>
Avalanche de neige <u>mouillée sans cohésion</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mêmes caractéristiques principales que le type d'avalanche précédent;</li> <li>• Neige mouillée a une plus grande densité ce qui la rend plus destructrice que l'avalanche de neige sèche;</li> <li>• Souvent déclenchées en fin de saison lors de la fonte ou lors d'épisodes de pluie ou de radiation solaire intense.</li> </ul>
Avalanche de <u>plaques de neige mouillée</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plaque de neige cohésive qui se détache en bloc;</li> <li>• Présence d'une couche fragile sous la plaque de neige favorisant le déclenchement en bloc;</li> <li>• Descente de l'avalanche suit le relief du terrain;</li> <li>• Souvent déclenchées en fin de saison.</li> </ul>
Avalanche de <u>plaques de neige de tempête</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Causés par une couche de neige fraîche surchargeant une couche supérieure fragile du couvert neigeux;</li> <li>• Densité de la plaque de neige parfois faible, mais la taille de celle-ci peut être très grande ce qui la rend destructrice;</li> <li>• Changements morphologiques des grains de neige qui tombent et dans les conditions météorologiques peuvent provoquer ce type d'avalanches;</li> <li>• Stabilité rapidement retrouvée après l'épisode de tempête (24 à 36h suivant la température).</li> </ul>
Avalanche de <u>plaques à vent</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Causé par une couche très cohésive de neige transportée par le vent surchargeant une couche fragile;</li> <li>• Cristaux de neige scindés puis enchevêtrés;</li> <li>• Plaques à vent formées sur les pentes sous le vent et où il y a un transport de neige latéral;</li> <li>• Taille des plaques à vent est fonction de la durée et de la vitesse des vents.</li> </ul>
Avalanche de <u>plaques persistante</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plaque de neige cohésive perdant petit à petit ses liaisons avec une couche de neige inférieure fragile;</li> <li>• Couche fragile est ensevelie plus profondément au fil du temps, ce qui augmente le potentiel destructeur de la plaque;</li> <li>• Propagation de la plaque est grande ce qui résulte en une possibilité de déclenchement à partir d'un terrain plat;</li> <li>• Avalanches de plaques persistantes se produisent souvent par cycles de faible ou de forte activité.</li> </ul>
Avalanche de <u>plaques persistantes profondes</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plaque de neige cohésive perdant petit à petit ses liaisons avec une couche de neige inférieure fragile;</li> <li>• Couche fragile est souvent formée en début de saison et est ensevelie très profondément dans le couvert neigeux;</li> <li>• Type d'avalanche fréquent en milieu alpin de haute altitude;</li> <li>• Type d'avalanche qui nécessite une lourde surcharge pour se déclencher, mais qui peut être entraîné par des avalanches de surface plus superficielles.</li> </ul>
Chute de <u>corniches</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Survient lorsqu'une accumulation de neige importante par le vent sur une rupture abrupte du terrain se déclenche;</li> <li>• Les corniches se forment souvent durant des tempêtes où la température est élevée, ce qui favorise la cohésion de la neige;</li> <li>• Lors de leur chute, elles peuvent provoquer une avalanche en raison de la surcharge rapide de neige apportée sur le terrain inférieur.</li> </ul>

De manière générale, le couvert neigeux est maintenu en place grâce à un équilibre des forces de résistance et de traction à l'intérieur de celui-ci en fonction de la pente. Lorsqu'il y a perte de cet équilibre, soit par l'ajout d'un poids sur le couvert neigeux ou par un changement rapide dans les conditions météorologiques (e.g. réchauffement, pluie), une rupture dans le couvert neigeux est possible (CAA, s.d.). Les avalanches de neige sans cohésion (*loose snow avalanches*) sont déclenchées lorsqu'il y a rupture de cet équilibre dans la couche de surface. Le processus de déclenchement des avalanches de plaques (*slab avalanches*) est plus complexe. La rupture de cet équilibre est généralement provoquée par un mouvement dans le couvert neigeux près de la couche fragile appelé *fracture de stress*. Ce mouvement provoque une fracture dans le couvert qui se propage jusqu'à un endroit où la tension dans la neige est grande. Lorsque la tension de cet endroit est supérieure à la tension présente dans la plaque de neige, une seconde fracture se produit (couronne) et provoque le déclenchement de l'avalanche (CAA, s.d.). La figure-2 montre les différentes parties d'une avalanche de plaques.



Figure 2. Composantes d'une avalanche (source : <http://meted.ucar.edu>)

La section appelée couronne (*crown*) est l'endroit où la seconde fracture se produit et est le point de départ de l'avalanche. Cette couronne s'étend jusqu'aux flancs (*flanks*) qui sont les limites latérales de l'avalanche. Le *stauchwall* représente la limite inférieure du décrochement et n'est

pas toujours visible. Finalement, le lit de l'avalanche (*bed surface*) est la couche faible sur laquelle reposait la neige qui s'est décrochée et qui est généralement responsable du déclenchement de l'avalanche.

### **2.3 Méthodes « traditionnelles » de prévision d'avalanches**

Les prévisionnistes d'avalanches utilisent sensiblement les mêmes procédures en ce qui a trait à l'évaluation de la stabilité du couvert neigeux et de la probabilité d'avalanches sur le terrain. Il est possible de répartir ces procédures en trois catégories : l'observation des conditions météorologiques passées, présentes et futures, l'observation de la structure du couvert neigeux et l'observation d'activités avalancheuses (CAA, 2007; SLF, 2014; AAA, 2014). Les prévisionnistes et agents de terrain recueillent des données météorologiques manuellement lors de routines quotidiennes de surveillance et automatiquement à l'aide de stations météorologiques. Les observations manuelles permettent de valider les prévisions de divers modèles météorologiques servant à observer l'évolution de systèmes météorologiques (McClung et Schaerer, 2006). Lors de sorties sur le terrain, ces observations permettent également de noter s'il y a un changement rapide dans les conditions pouvant mener au développement d'instabilités dans le couvert nival (présence de couches faibles). Les données de stations météorologiques automatiques sont quant à elles utilisées afin d'obtenir un jeu de données continu permettant d'alimenter les bulletins de prévision d'avalanche ou encore afin de servir de données entrantes à des modèles de simulation de couvert neigeux (Lehning *et al.*, 1999).

L'observation et le suivi de la structure du couvert neigeux sont les étapes les plus importantes du processus de prévision du risque d'avalanches. Les prévisionnistes et agents de terrains se rendent quotidiennement à des endroits ciblés afin d'effectuer des mesures et tests afin d'obtenir de l'information sur la stabilité du couvert. Selon les normes de l'ACA (CAA, 2007), les données recueillies sont : la température ambiante, la température de surface, le profil de température jusqu'au sol, la stratigraphie du couvert selon les types de grains de neige, leur taille et leur état (sec ou humide), la résistance (test avec la main) et la densité des couches. Des tests de stabilité sont également effectués et complètent les observations faites. Les tests de stabilités principaux effectués par les prévisionnistes et agents de terrains membres de l'ACA sont : le *shear frame test*, le *Rutschblock test*, le *shovel shear test*, le *compression test*, le *deep tap test* et

le *fracture character test* (CAA, 2007). Ces données servent à produire un profil de neige complet selon les normes en place (voir annexe pour un exemple de profil de neige de l'ACA).

Finalement, un indicateur fiable du risque d'avalanches est l'observation directe de celles-ci. La présence de débris d'avalanche frais ou l'observation d'un décrochement nouveau est un indicateur de présence d'instabilité dans les pentes (CAA, s.d.) et peut être mise en relation avec les observations météorologiques et celles faites dans la structure du couvert neigeux décrites ci-haut. De plus, l'observation d'avalanches est essentielle afin d'évaluer la performance des mesures de contrôle et d'aider à la planification de construction d'infrastructures touristiques ou de contrôle (CAA, 2007).

Au Canada, l'ensemble des informations recueillies précédemment est ensuite mis en commun par tous les intervenants en sécurité avalanche sur un portail cartographique nommé *InfoEX* (CAA, 2012). Les intervenants licenciés du milieu peuvent ainsi retrouver de l'information leur permettant d'assurer un meilleur suivi quotidien des couches fragiles présentes dans le couvert neigeux selon leur situation géographique et conséquemment améliorer leurs prévisions. Ils sont finalement en mesure de produire des bulletins entre 2 à 4 fois par semaine pour les différentes régions et parcs nationaux du Canada pour lesquels ils sont responsables.

## **2.4 Modèles numériques de simulation de couvert neigeux**

Il existe une variété de modèles de neige utilisés dans une multitude d'applications telles que l'hydrologie, le bilan d'énergie terrestre, le suivi de la fonte, la recherche sur les processus physiques climatiques ainsi que la prévention d'avalanches (Etchevers *et al.*, 2002). Armstrong et Brun (2008) recensent ces modèles en trois grandes catégories : les modèles à une couche, les modèles de complexité intermédiaire et les modèles détaillés.

Les modèles de neige à une couche sont généralement intégrés dans des modèles de prévision météorologique et de climat global et les paramètres qui les régissent sont habituellement fixes (Vionnet *et al.*, 2012). Ceux-ci sont fréquemment intégrés dans des modèles de complexité supérieure (*Ibid*, 2012). Les modèles *D95* (Douville *et al.*, 1995) et *EBA* (Bazile *et al.*, 2002) sont des exemples de modèle à une couche implémentés dans des modèles de complexité intermédiaire. Les modèles de complexité intermédiaire intègrent certains processus physiques régissant le couvert neigeux tels que le compactage des grains de neige, le mouvement de l'eau

dans le couvert et le regel. Ils sont également aptes à caractériser de façon générale la stratigraphie en 2 à 5 couches en se basant principalement sur la densité de la neige (Boone et Echevers, 2001). Les modèles *JULES* (Best *et al.*, 2011), *CLASS* (Brown *et al.*, 2006), *CLM* (Oleson *et al.*, 2010), *WEB-DHM* (Shresta *et al.*, 2010) et *Snow 17* (Anderson, 1976) sont des exemples de modèles de complexité intermédiaire. Finalement, la troisième classe de modèle de neige est plus limitée et inclut les modèles *SNTHERM* (Jordan, 1991), *Crocus* (Brun *et al.*, 1989, 1992) et *SNOWPACK* (Bartelt et Lehning, 2002; Lehning *et al.*, 2002a, 2002b). Ces modèles intègrent le rôle de la morphologie des grains de neige dans les processus physiques gérant le couvert neigeux en se basant sur la dendricité et la sphéricité de ceux-ci (Vionnet *et al.*, 2012) et sont les plus efficaces pour reproduire l'évolution du couvert neigeux au fil de l'hiver comme le démontre le projet SnowMIP (*Snow Model Intercomparison Project* : Etchevers *et al.*, 2002).

Les prévisionnistes et intervenants dans le milieu de la prévention d'avalanche commencent de plus en plus à utiliser les modèles détaillés de simulation de couvert neigeux afin de les aider dans leurs prises de décisions (Bellaire *et al.*, 2006; Nishimura *et al.*, 2005; McElwaine *et al.*, 2000). L'utilisation faite de ces modèles par ceux-ci varie d'un endroit à l'autre. En Suisse, par exemple, où le modèle *SNOWPACK* a été développé, celui-ci est utilisé de manière opérationnelle sur un vaste réseau de stations météorologiques depuis 1997-1998 (Lehning *et al.*, 1999). La complexité de ce modèle implique également beaucoup de recherche et de développement sur les différents modules qui le gouverne, et peuvent être adaptés à la réalité locale (forçage sur l'épaisseur de neige, paramétrisation de la phase de la précipitation, module de neige soufflée, interception par la végétation et type de sol agissant sur le flux géothermique, aspect et finalement l'altitude). Tous ces paramètres peuvent être prescrits dans le fichier de configuration du modèle. Comme le but premier de ce modèle est d'aider à la prise de décision face aux risques d'avalanches, les indices de stabilité et l'évaluation générale de la stabilité du couvert neigeux ont fait l'objet de plusieurs recherches et sont encore des sujets d'études actuels (Bellaire et Jamieson., 2013a, 2013b, Bellaire *et al.*, 2011; 2006). Le modèle *SNOWPACK* est toutefois un modèle unidimensionnel, c'est-à-dire qu'il ne spatialise pas les paramètres simulés. Lehning *et al.* (2006) ont ainsi développé *Alpine3D*, un dérivé tridimensionnel du modèle *SNOWPACK* simulant les processus de surface liés à la neige en milieu alpin en intégrant des modules de bilan radiatif et transport de neige. Ce modèle est utilisé pour des applications telles que la prévention d'avalanche, l'évolution du pergélisol, l'évaluation de l'équivalent en eau de la



neige, le couplage avec des modèles climatiques ainsi que les changements dans les régimes végétaux (*Ibid*, 2006), mais n'a pas été utilisé dans ce mémoire pour des causes de contraintes informatiques et logistiques.

En somme, les modèles numériques de simulation de couvert neigeux sont de plus en plus efficaces pour caractériser le couvert neigeux et permettent d'évaluer des processus complexes comme la formation d'avalanches avec plus de précision tout en limitant les difficultés logistiques. Toutefois, l'étendue des données pouvant être utilisées dans ces modèles ne cesse d'augmenter et il est nécessaire de réévaluer constamment ces possibilités dans le but d'améliorer la précision des simulations et au final augmenter les possibilités pour les intervenants du milieu de la prévention d'avalanches.

### 3. Cadre expérimental

#### 3.1 Zones d'étude

Trois sites d'études ont été visités à différents moments durant les deux hivers du projet. Les campagnes terrains ont eu lieu au mois de janvier pour les monts Chic-Chocs et au moins de décembre et mars dans l'ouest canadien. Ces moments ont été choisis afin d'avoir des couvert neigeux de début (Chic-Chocs, ouest canadien) et de fin de saison (ouest canadien). La figure suivante pointe ces différents sites.



Figure 3. Emplacement des sites d'études du projet. (A) Mont Fidelity, Parc National des Glaciers, Colombie-Britannique. (B) Marmot Basin, Parc National de Jasper, Alberta. (C) Monts Chic-Chocs, Parc National de la Gaspésie, Québec. (Source : Google Maps).

##### 3.1.1 Mont Fidelity, Parc National des Glaciers, Colombie-Britannique, Canada

Le premier site d'étude est le Mont Fidelity, situé dans le Parc National des Glaciers, en Colombie-Britannique. Ce mont fait partie de la chaîne de montagnes Columbia qui elle fait partie de la ceinture humide intérieure de la Colombie-Britannique. Le climat transitionnel chaud aux précipitations abondantes de cette partie de la province est régi par les masses d'air chaudes et humides du Pacifique qui, bien qu'affaiblies par leur passage dans les montagnes côtières, sont déviées vers le haut (soulèvement orographique) par la chaîne de montagnes Columbia (Parcs Canada, 2009b). Le col Rogers, où est situé le Mont Fidelity est l'endroit au Canada où la neige y est la plus abondante. Un couvert neigeux d'environ 2m à 3m recouvre le sol de la mi-octobre à la mi-juin en région subalpine (*Ibid*, 2009b). Les principales causes d'avalanches dans ce secteur sont l'abondance des précipitations combinée aux températures douces, ce qui produit fréquemment des plaques de neige instables. Une carte détaillée du site d'étude est présentée à l'annexe 1.

### **3.1.2 Marmot Basin, Parc National de Jasper, Alberta, Canada**

Le second site d'étude est Marmot Basin, un centre de ski situé en région subalpine dans le Parc National de Jasper, en Alberta. Ce centre présente la plus haute élévation de base pour un centre de ski au Canada (1697 m) et culmine à 2612 m d'altitude (Marmot Basin Ski Resort, 2014). La région supérieure des pistes de ski est fréquemment sujette à des avalanches et doit constamment être sous surveillance. Les versants opposés à la station sont également fréquemment empruntés par les amateurs de ski hors-piste en raison de la grande accessibilité de la montagne. Le climat sec de montagne de ce site d'étude est caractérisé par des précipitations de neige d'environ 0,4m par année (Marmot Basin Ski Resort, 2014) et un climat froid (moyenne de -9,4°C en janvier) où des vents considérables frappent la montagne (Parcs Canada, 2009a) menant à la formation fréquente de plaques de vent potentiellement instables. Une carte détaillée du site d'étude est présentée à l'annexe 2.

### **3.1.3 Monts Chic-Chocs, Parc National de la Gaspésie, Québec, Canada**

Le troisième site d'étude, les monts Chic-Chocs, font partie des monts Notre-Dame qui sont la continuation de la chaîne de montagnes des Appalaches. Ils sont situés dans le Parc National de la Gaspésie et sont soumis à un climat de type continental humide avec influence maritime côtier. Les monts Chic-Chocs longent le fleuve St-Laurent à une distance de 20 à 40 km à l'intérieur des terres sur environ 95 km de longueur et 10 km de largeur (Commission de toponymie du Québec, 2012). Cette zone du massif gaspésien est l'endroit, à égalité avec les monts McGerrigle, qui reçoit le plus de précipitations au Québec (SÉPAQ, 2014). L'influence d'inversions thermiques fréquentes et des masses d'air océaniques, combinées à l'effet orographique en montagnes favorisent le développement d'instabilité dans le couvert neigeux qui reste au sol près de 200 jours par années (Germain et Voiculescu, 2007). Une carte détaillée du site d'étude est présentée à l'annexe 3.

## **3.2 Données du projet**

### **3.2.1 Données météorologiques**

#### ***3.2.1.1 Stations météorologiques automatiques***

Des données provenant de stations météorologiques automatiques à chacun des sites d'études ont pu être utilisées afin de réaliser les simulations et valider les données météorologiques de réanalyses. Le tableau suivant présente le nom des stations météorologiques automatiques pour

chacun des sites d'études et les données produites à chacune d'elles qui sont utilisables dans le modèle *SNOWPACK*.

**Tableau 3. Stations météorologiques automatiques du projet et variables mesurées**

		Parc national de la Gaspésie		Parc national des Glaciers		Parc national de Jasper (Martmot Basin Ski Resort)		
		<u>CQGI</u>	<u>Caela</u>	<u>Fidelity</u>	<u>Hermitt</u>	<u>UdeS</u>	<u>Marmot</u>	<u>Paradise</u>
Variable	Unité							
Température de l'air	K	x	x	x	x	x	x	x
Humidité relative	0-1	x	x	x	x	x	x	x
Longues ondes entrant	W m <sup>-2</sup>		x	x		x		
Longues ondes sortant	W m <sup>-2</sup>					x		
Courtes onde entrant	W m <sup>-2</sup>		x	x		x		
Courtes onde sortant	W m <sup>-2</sup>					x		
Température à la surface	K					x		
Température du sol	K					x		
Vitesse du vent	m s <sup>-1</sup>	x	x		x	x		x
Direction du vent	°	x	x		x	x		x
Précipitation	mm	x	x	x	x		x	
Hauteur de neige	cm	x	x	x	x	x	x	

### 3.2.1.2 Données de réanalyses météorologiques

Les données du modèle *Global Environmental Multiscale* (GEM) tournant sous le Système régional de prévision déterministe (SRPD) sont acquises via le Centre Météorologique Canadien. Dans le cadre de ce projet, trois versions du modèle GEM sont acquises : GEM10, GEM15 et GEM-LAM. Le modèle GEM10 est géolocalisé sur une grille polaire stéréographique de 935x824 points, couvrant la totalité de l'Amérique du Nord à une résolution de 10km. Le modèle regroupe 289 variables météorologiques réparties sur 28 niveaux isobariques de pression atmosphérique (Gouvernement du Canada, 2014a). Dans le cadre de ce projet, les données acquises sont les taux de précipitations (kg/m<sup>2</sup>), la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse et direction du vent, le rayonnement incident de courtes et longues longueurs d'onde pour les niveaux isobariques de 750mb, 800mb, 900mb et de surface. Le modèle GEM15 est très similaire au modèle GEM10 outre la résolution spatiale plus grossière (grille de 493x399 points couvrant l'Amérique du Nord à une résolution de 15km). Ce modèle regroupe également 289 variables météorologiques sur 28 niveaux isobariques (Gouvernement du Canada, 2014b). Les variables et niveaux isobariques utilisés sont les mêmes que pour le modèle GEM10. Le modèle GEM-LAM (*Limited Area Model*) est quant à lui un modèle offert pour certaines parties de

l'Amérique du Nord, soit les provinces maritimes, le sud-ouest du Québec, le sud-est de l'Ontario, l'ouest canadien et l'archipel arctique. Ce modèle tourne sous le Système à haute résolution de prévision déterministe (SHRPD, basé sur le SRPD) et offre des données météorologiques à une résolution de 2,5km deux fois par jour pour 28 niveaux isobariques (Gouvernement du Canada, 2014c). GEM-LAM a été conçu afin d'offrir un modèle plus représentatif au niveau local que les modèles régionaux GEM10 et GEM15. Les variables et niveaux isobariques disponibles et acquis sont les mêmes que les deux autres versions de GEM. Les données des différents modèles GEM sont acquises en format *GRIB2* et converties lors de prétraitements en format *SMET* (Bavay, 2012).

### 3.2.2 Données de validation in-situ

Chacun des sites d'étude du projet a été visité une ou plusieurs fois durant les deux hivers (2013-2014 et 2014-2015) du projet. Pour chacun d'eux, des données sur la stratigraphie (profil de neige selon les standards d'Avalanche Canada), de résistance des couches (*Snowmicropen* et *RAM-penetrometer*), de température, de densité et de surface spécifique des grains de neiges ont été recueillies. Le tableau suivant présente le nombre de profils réalisés pour chacun des sites d'observations pour chaque hiver du projet.

Tableau 4. Nombre de profils d'observation par hiver, par site d'étude

	<i>Hiver 2013-2014</i>	<i>Hiver 2014-2015</i>
Mont Fidelity, BC	5	12
Marmot Basin, AB	6	0
Chic-Chocs, QC	8	9

Le nombre de profils d'observation étant limité par les contraintes logistiques qu'imposent des campagnes terrains en milieux isolés et avalancheux, et par l'épaisseur du couvert de neige disponible, les données du site de partage d'informations d'Avalanche Canada *InfoEX* ont pu être utilisées afin d'obtenir une information complémentaire sur le couvert neigeux présent dans les différentes zones d'étude du projet. De l'information spatialisée sur l'occurrence des avalanches, la présence de couches faibles persistantes et sur la stratigraphie du couvert neigeux est disponible sur ce portail de partage alimenté par les différentes opérations touristiques et de prévention d'avalanche partout au Canada.

### 3.3 Méthodologie

Le schéma méthodologique suivant présente les différentes étapes du projet qui seront détaillées plus en détail dans cette section.

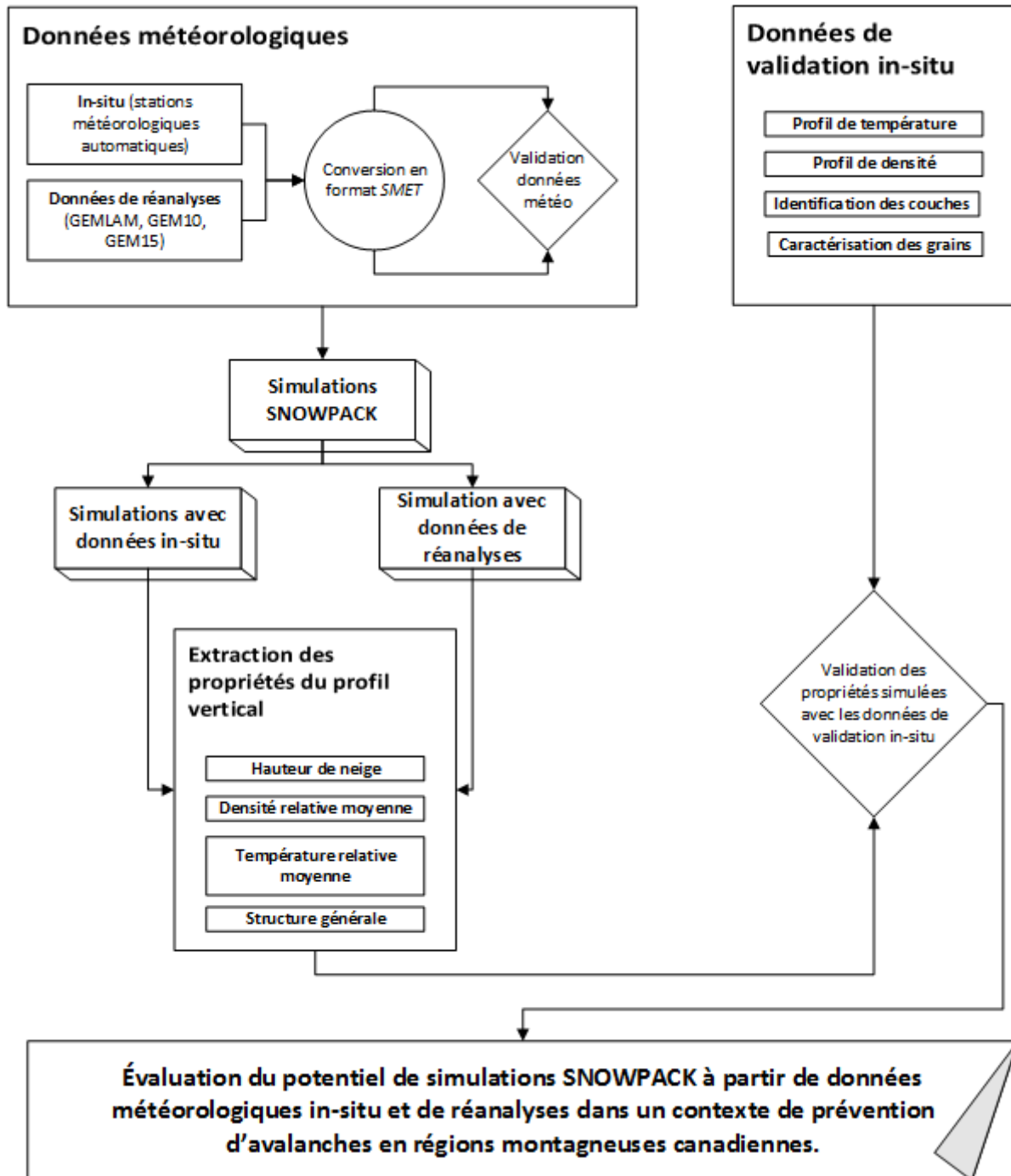


Figure 4. Schéma méthodologique du projet

### 3.3.1 Extraction et conversion des données météorologiques

Les données météorologiques de réanalyses ont été transformées en format *SMLET* à l'aide d'un module d'extension du modèle *MeteoIO* développé par le groupe ASARC de l'Université de Calgary. Ce module extrait, convertit et formate les données GEM brutes (*GRIB2*) en format *SMET* utilisable dans *SNOWPACK*.

### 3.3.2 Validation des données météorologiques de prévision

Chacune des variables météorologiques utilisées dans les simulations *SNOWPACK* a été comparée aux variables associées provenant de données de stations météorologiques automatiques à chacun des sites d'étude. Le but de cette comparaison est de valider la précision des modèles météorologiques GEM et de permettre un éventuel ajustement de ces variables, dans l'optique d'évaluer la sensibilité du modèle *SNOWPACK* à celles-ci (Bellaire *et al.*, 2011). Le tableau suivant présente l'intervalle de temps sur lequel la validation et les simulations ont été effectuées pour chacune des données météorologiques disponibles. L'intervalle temporel de chacune des données à l'état brut étant différent, les intervalles présentés dans cette section sont ceux communs à toutes les données afin de permettre la validation entre elles.

Tableau 5. Périodes utilisés pour la validation des données météorologiques

	Hiver 2013-2014		Hiver 2014-2015	
	<i>Début</i>	<i>Fin</i>	<i>Début</i>	<i>Fin</i>
Mont Fidelity, BC	10-10-2013	12-04-2014	03-11-2014	15-04-2015
Marmot Basin, AB	29-11-2013	14-04-2014	-	-
Chic-Chocs, QC	09-11-2013	30-04-2014	01-11-2014	14-04-2015

Comme le site de Marmot Basin dans le Parc National de Jasper n'a été visité que durant l'hiver 2013-2014 et que la station météorologique automatique de référence de notre équipe (CRNSG-OIR Langlois) qui y était présente a été retirée, il n'y a pas eu de validation et de simulations à ce site pour l'hiver 2014-2015.

Les données météorologiques ont été comparées entre elles pour chacun des pas de temps (1h) des périodes présentées ci-haut. Afin d'obtenir un plus grand échantillon, les données des hivers 2013-2014 et 2014-2015 ont été combinées pour cette analyse. La variable de direction du vent

n'a pas été incluse dans cette analyse en raison de la trop grande variabilité dans les mesures horaires prises par les stations de mesures automatiques.

### **3.3.3 Simulations *SNOWPACK***

Suivant la validation des données météorologiques de réanalyses, des simulations *SNOWPACK* ont été réalisées avec chacune d'elles comme intrant ainsi qu'avec les données météorologiques provenant des stations de mesures automatiques de chacun des sites d'étude. Cet exercice a permis de comparer l'efficacité des différents types de données météorologiques lorsqu'utilisés comme intrant dans le modèle *SNOWPACK*.

Les simulations ont été effectuées avec la version 3.2.1 de *SNOWPACK*. Le paramètre de correction de la stabilité atmosphérique recommandé en terrain complexe et utilisé est le Monin-Obukhov (Monin et Obukhov, 1954) forcé à être indépendant de la stratification atmosphérique actuelle (utilisation de paramètres neutres de stratification). Un paramètre d'ajustement de la rugosité dynamique est mis à 0.01, ce qui est une valeur recommandée dans la documentation du modèle lorsque celui-ci est utilisé pour un site d'étude au relief accidenté. La majorité des autres paramètres a été laissée aux valeurs par défaut puisqu'ils n'apportaient pas de différences significatives dans les sorties du modèle ou parce qu'il nous était impossible d'amener objectivement une autre valeur autre que celle par défaut.

### **3.3.4 Évaluation de la précision des simulations**

La validation des sorties des simulations a été effectuée à l'aide des données in-situ fournies par nos partenaires et celles acquises lors des campagnes de terrain par notre équipe. Cette étape a permis de vérifier la précision de la caractérisation de la neige par le modèle *SNOWPACK*. Afin de permettre ces validations, des scripts *MATLAB* ont été spécialement développés afin de permettre l'extraction de l'information nécessaire aux analyses des fichiers *PROFILE* qui contiennent l'ensemble des informations sur la structure du couvert de neige simulé par *SNOWPACK*.

Les simulations avec les données météorologiques in-situ et de réanalyses ont été validées par rapport à la hauteur de neige (HN) simulée, la densité et la température moyenne relative ainsi que la structure générale du couvert.



#### 3.3.4.1 Hauteur de neige

Pour réaliser cette analyse, les sorties de HN ont été extraites des simulations forcées avec chacun des modèles météorologiques pour chacun des sites d'études. Au Mont Fidelity, la validation des HN a été effectuée en comparant quotidiennement les HN simulées à 12:00 PM. Ce moment de la journée a été choisi afin d'être en accord avec la mesure quotidienne prise sur le terrain par les techniciens de Parcs Canada à ce site d'étude. Pour le site d'étude des monts Chic-Chocs, chacun des pas de temps (1h) a été comparé avec les données simulées puisque les données de validation de HN étaient acquises par une station de mesures automatiques à ce même intervalle.

#### 3.3.4.2 Densité relative moyenne

Puisque le modèle *SNOWPACK* modélise un nombre élevé de couches dans le couvert neigeux (plus de 100 couches superposées pour un couvert neigeux de 2 m) et qu'il est impossible et non pertinent de tous les recenser lors de l'observation de la stratigraphie sur le terrain, une méthode de mesure de la densité relative moyenne du couvert neigeux a été définie (équation #1) :

$$(1) D_{moy} = \sum \frac{(c_i \times d_i)}{H_s}$$

où  $c$  représente l'épaisseur de la couche  $i$ ,  $d$  représente la densité de la couche  $i$ ,  $H_s$  l'épaisseur totale du couvert neigeux pour la date spécifiée et  $D_{moy}$  la mesure de densité relative moyenne du couvert neigeux.

. Cette méthode attribue à la valeur de densité de chaque couche un poids en fonction de son épaisseur par rapport à l'épaisseur totale du couvert. La somme de ces mesures pondérées résulte en la mesure de densité relative moyenne pour une date donnée. Cette valeur est ensuite comparée, pour chaque date où un profil d'observation a été réalisé sur le terrain, avec les données de validation in-situ.

L'analyse des densités et températures relatives moyennes (section suivante) n'a pas été effectuée au site de Marmot Basin en raison d'un échantillon trop faible de données de validation.

#### 3.3.4.3 Température relative moyenne

Une analyse de la température relative moyenne a été réalisée pour les hivers 2013-2014 et 2014-2015 combinés afin d'évaluer la capacité du modèle à représenter efficacement la température interne du couvert neigeux. Cette étape consiste, tout comme pour la densité, à obtenir une valeur de température pondérée pour la totalité du profil vertical de neige. Cette valeur, bien que non représentative du métamorphisme possible de la neige pour une date donnée, permet de comparer, de manière générale, la température à l'intérieur du couvert neigeux simulé et observé. L'équation #2 présente le calcul nécessaire pour obtenir cette valeur.

$$(2) T_{moy} = \sum \frac{(c_i \times t_i)}{H_s}$$

où  $c$  représente l'épaisseur de la couche  $i$ ,  $t$  représente la température de la couche  $i$ ,  $H_s$  l'épaisseur totale du couvert neigeux pour la date spécifiée et  $T_{moy}$  la mesure de température relative moyenne du couvert neigeux.

#### 3.3.4.4 Structure du couvert neigeux

La dernière étape de validation des simulations consiste en une évaluation qualitative de la performance du modèle à simuler les différentes couches critiques présentes dans le couvert neigeux pour les sites d'étude du Mont Fidelity et des monts Chic-Chocs. Pour réaliser cette étape, la réaction du modèle à des événements météorologiques importants pouvant avoir affecté la structure du couvert neigeux a été analysée. Les simulations *SNOWPACK* à partir des données météorologiques *in-situ* ont été utilisées comme simulations de référence pour cette analyse. Les simulations avec les données météorologiques des modèles GEM-LAM, GEM10 et GEM15 n'ont pas été utilisées puisque l'objet de cette étape était seulement de vérifier la réaction du modèle dans des contextes climatiques différents (climat transitionnel versus climat continental humide). Les sorties *SNOWPACK* du type de grain de neige et de la taille des liens entre ceux-ci ont été utilisées afin de centrer cette analyse sur la présence des couches critiques (croûtes de glaces, givre de surface et givre de profondeur).

## 4. Présentation et analyse des résultats

La validation des données météorologiques est présentée pour chacun des sites d'étude et chacun des hivers du projet. Suivant cela, les analyses sur les sorties importantes du modèle *SNOWPACK* et sur la structure du couvert neigeux simulé sont détaillées.

### 4.4 Validation des données météorologiques

#### 4.4.1 Mont Fidelity

Les tableaux suivants présentent la comparaison entre les données météorologiques de référence (e.g. stations météorologiques) et les données de réanalyses pour chacun des deux hivers pour le site du Mont Fidelity dans le Parc National des Glaciers en Colombie-Britannique. Les données de radiation solaire du modèle GEM-LAM n'étant plus archivées par le CMC depuis l'automne 2014, la validation n'a pu être effectuée sur les deux variables qui lui sont relatives pour l'hiver 2014-2015.

**Tableau 6. Paramètres statistiques des nuages de points issus de la comparaison entre données météorologiques modélisées et observées pour l'hiver 2013-2014 au site d'étude du Mont Fidelity (souligné: meilleure valeur parmi les 3 modèles météorologique). Variables présentées : température ( $T^\circ$ ), humidité relative (RH), radiation courte longueur d'onde (ISWR), radiation longue longueur d'onde (ILWR), vitesse du vent (WSpeed) et précipitation (PSUM).**

Validation des données météo au Mt. Fidelity (2013-2014)												
	GEM10				GEM15				GEMLAM			
	<i>m</i>	<i>b</i>	$R^2$	RMSE	<i>m</i>	<i>b</i>	$R^2$	RMSE	<i>m</i>	<i>b</i>	$R^2$	RMSE
$T^\circ$	<u>1,01</u>	<u>-0,80</u>	0,95	1,97	1,01	-1,11	<u>0,96</u>	1,96	0,92	21,69	0,95	<u>1,80</u>
RH	0,75	<u>8,05</u>	0,62	19,01	0,75	8,51	0,62	18,85	<u>1,00</u>	-13,68	<u>0,74</u>	<u>18,22</u>
ISWR	0,44	78,19	0,53	158,43	0,44	<u>76,94</u>	0,53	157,86	<u>0,56</u>	96,17	<u>0,58</u>	<u>150,50</u>
ILWR	0,61	85,12	0,69	37,52	0,62	84,68	0,70	37,73	<u>0,77</u>	53,18	<u>0,73</u>	<u>37,14</u>
Wspeed	0,24	1,69	0,46	2,87	0,21	<u>1,63</u>	0,44	2,97	<u>0,30</u>	2,21	<u>0,58</u>	<u>2,38</u>
PSUM	0,33	<u>0,10</u>	0,51	0,46	0,34	0,11	<u>0,51</u>	<u>0,46</u>	<u>0,65</u>	0,12	0,48	0,64

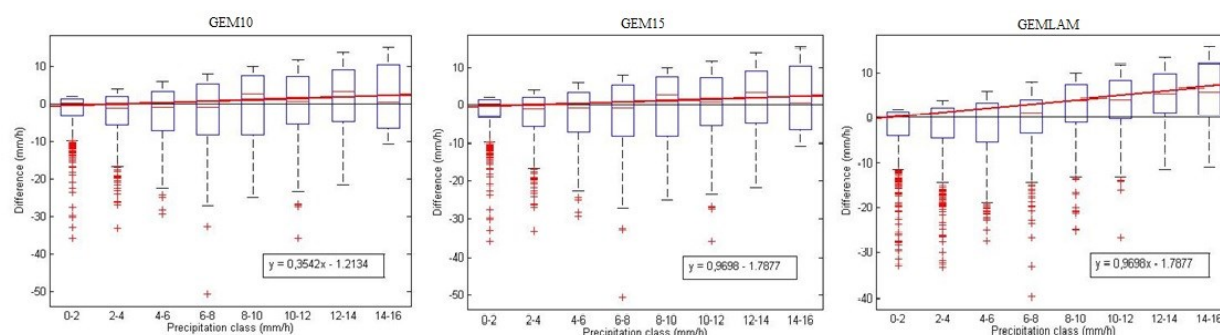
**Tableau 7. Paramètres statistiques des nuages de points issus de la comparaison entre données météorologiques modélisées et observées pour l'hiver 2014-2015 au site d'étude du Mont Fidelity (souligné: meilleure valeur parmi les 3 modèles météorologique). Variables présentées : température ( $T^\circ$ ), humidité relative (RH), radiation courte longueur d'onde (ISWR), radiation longue longueur d'onde (ILWR), vitesse du vent (WSpeed) et précipitation (PSUM).**

Validation des données météo au Mt. Fidelity (2014-2015)												
	GEM10				GEM15				GEMLAM			
	<i>m</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>RMSE</i>	<i>m</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>RMSE</i>	<i>m</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>RMSE</i>
<i>T</i> °	0,90	26,12	0,94	1,64	<u>0,91</u>	<u>25,38</u>	0,94	<u>1,62</u>	0,84	43,69	0,91	2,08
<i>RH</i>	0,75	0,15	0,71	0,14	0,73	0,16	0,71	0,14	<u>0,86</u>	<u>0,04</u>	<u>0,73</u>	0,15
<i>ISWR</i>	<u>0,11</u>	<u>148,82</u>	<u>0,13</u>	<u>216,64</u>	0,11	153,36	0,13	218,57	-	-	-	-
<i>ILWR</i>	0,61	97,18	<u>0,77</u>	<u>32,55</u>	0,61	<u>97,00</u>	0,77	<u>32,48</u>	-	-	-	-
<i>Wspeed</i>	0,17	1,84	<u>0,31</u>	<u>2,76</u>	0,15	<u>1,77</u>	0,30	2,83	<u>0,18</u>	5,26	0,13	4,01
<i>PSUM</i>	0,25	<u>0,08</u>	<u>0,58</u>	<u>0,50</u>	0,25	0,09	0,54	0,50	<u>0,43</u>	0,12	0,34	0,77

Pour la majorité des variables météorologiques, le modèle GEM-LAM est celui performant le mieux parmi les trois modèles lorsque comparé aux données de la station de mesures automatiques du site d'étude pour l'hiver 2013-2014. Le modèle GEM-LAM présente le meilleur coefficient de pente (*m*) pour toutes les variables météorologiques à l'exception de la température de l'air où les modèles GEM10 et GEM15 sont plus performants. Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) de 0,91 et le RMSE de 2,08 pour les données GEM-LAM confirment malgré tout une modélisation performante de cette variable par le modèle. Les variables de radiation solaire (ISWR et ILWR) affichent des coefficients de pente plus faibles qui peuvent être expliqués par la localisation géographique de la station météorologique de référence de ce site d'étude. Ce type de variable est modélisé dans les modèles météorologiques de sorte que la radiation solaire soit constante sur une cible du lever au coucher du soleil. La réalité de la radiation solaire incidente en montagne et dans les modèles est toutefois différente compte tenu de l'effet des parois montagneuses adjacentes au site de référence qui limitent l'exposition au soleil des capteurs en débuts et fins de journée. Cet effet est d'ailleurs important au site d'étude du Mont Fidelity puisque la station météorologique de référence n'est pas au sommet et est localisée sur le versant sud-est de la montagne. Cette position fait en sorte que les capteurs captent toute la radiation solaire incidente en début de journée, mais cesse de capter la radiation plus tôt que la normale en fin de journée puisque le soleil frappe le côté opposé de la montagne. C'est donc dire que pour la première partie de la journée, les données modélisées et réelles sont en accord alors que pour la seconde partie de la journée, le modèle surestime la radiation mesurée sur le terrain. La performance du modèle GEM-LAM est cependant moins bonne pour l'hiver 2014-2015 où

les modèles GEM10 et GEM15 présentent de meilleurs résultats. La tendance générale de précision est à la baisse pour tous les modèles météorologiques par rapport à l'hiver 2013-2014. La modélisation des données de radiation incidente de courtes longueurs d'onde est d'ailleurs très imprécise, présentant des coefficients de pente très faibles (0,11) et une erreur quadratique moyenne élevée (216,64 et 218,57  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

La figure suivante présente une évaluation du biais (donnée modélisée – donnée observée), pour chaque modèle météorologique, de la variable de précipitation lorsque celle-ci est séparée en classe d'intensité de précipitation. Les données de précipitation pour les deux hivers combinés ont été utilisées pour cette analyse.



**Figure 5. Évaluation du biais (données modélisées - données observées) pour la variable d'intensité de précipitation pour les hivers 2013-2014 et 2014-2015 au site d'étude du Mont Fidelity.**

La tendance générale dans ces graphiques montre une modélisation plus précise des précipitations par les modèles météorologiques lorsque l'intensité des précipitations est plus faible. Pour les trois modèles, le biais observé augmente avec l'intensité de façon linéaire. Le modèle GEM-LAM, qui offre la meilleure résolution spatiale parmi les modèles GEM, est celui qui surestime le plus les hautes classes de précipitation. L'efficacité discutable des pluviomètres installés sur les stations météorologiques (surtout en conditions venteuses, les stations n'étant pas tous dotées de déflecteurs de vent) de mesures automatiques en montagne peut en partie expliquer ce résultat (Schirmer, 2015). Le jeu de données est également réparti sur deux saisons seulement et validé avec une seule station de mesures automatique, ce qui pose une certaine limite. Une station de mesure automatique peut parfois être sujette à des événements météorologiques isolés et non représentatifs de l'étendue spatiale représentée par un pixel dans les données météorologiques de réanalyses, ce qui peut certainement apporter un biais lors de la

validation des données lorsqu'on utilise un modèle à résolution spatiale plus fine. Il est aussi important de préciser que les données de réanalyses sont disponibles pour certains niveaux isobariques seulement. Le niveau isobarique utilisé pour ce site d'étude présente une différence d'altitude de l'ordre de près de 200m avec l'altitude réelle du site, ce qui apporte une source d'incertitude supplémentaire.

#### 4.4.2 Marmot Basin

Le tableau suivant présente la comparaison entre les données météorologiques de référence et les données de réanalyses pour l'hiver 2013-2014 au site de Marmot Basin dans le Parc National de Jasper en Alberta. La comparaison porte seulement sur l'hiver 2013-2014 puisque nous n'avons pu obtenir de données météorologiques de stations de mesures automatiques pour le second hiver du projet à ce site d'étude.

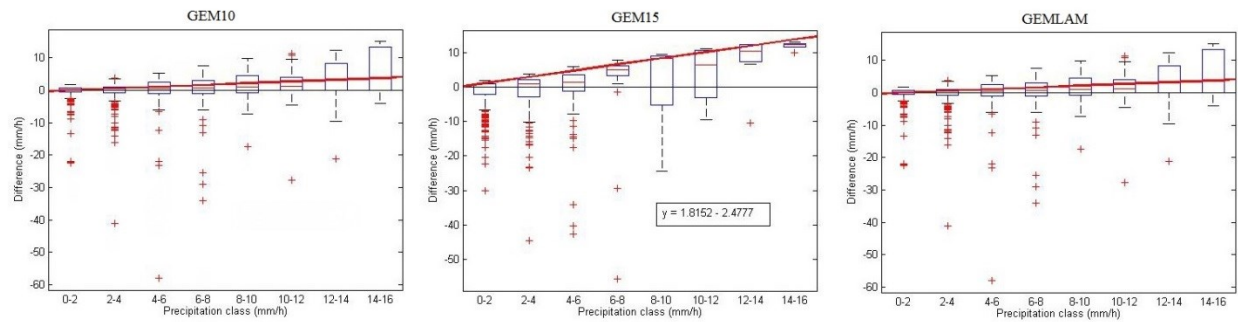
**Tableau 8. Paramètres statistiques des nuages de points issus de la comparaison entre données météorologiques modélisées et observées pour l'hiver 2013-2014 au site d'étude de Marmot Basin (souligné: meilleure valeur parmi les 3 modèles météorologique). Variables présentées : température ( $T^{\circ}$ ), humidité relative (RH), radiation courte longueur d'onde (ISWR), radiation longue longueur d'onde (ILWR), vitesse du vent (WSpeed) et précipitation (PSUM).**

Validation des données météo à Marmot Basin (2013-2014)												
GEM10				GEM15				GEMLAM				
	$m$	$b$	$R^2$	RMSE	$m$	$b$	$R^2$	RMSE	$m$	$b$	$R^2$	RMSE
$T^{\circ}$	<u>0,97</u>	<u>7,41</u>	0,94	2,47	0,97	8,63	0,94	2,46	0,94	17,16	<u>0,96</u>	<u>1,90</u>
$RH$	0,50	32,50	<u>0,69</u>	<u>13,50</u>	0,50	32,79	0,67	13,83	<u>0,52</u>	<u>29,29</u>	0,67	14,49
$ISWR$	0,27	146,95	0,30	204,69	0,27	145,93	0,31	203,86	<u>0,73</u>	<u>71,44</u>	<u>0,80</u>	<u>111,20</u>
$ILWR$	0,81	-5,87	<u>0,68</u>	63,67	0,79	<u>-3,07</u>	0,66	64,24	<u>1,16</u>	-83,08	0,67	<u>56,45</u>
$Wspeed$	<u>1,12</u>	2,09	<u>0,51</u>	3,25	0,78	1,83	0,47	2,34	0,18	<u>1,02</u>	0,35	<u>1,21</u>
$PSUM$	0,11	0,06	0,27	0,42	0,13	0,07	0,29	0,42	0,57	0,08	0,57	0,39

La tendance générale pour ce site d'étude montre que les données GEM-LAM offrent une précision supérieure aux autres modèles pour la majorité des variables. À titre d'exemple, les données GEM-LAM de radiation solaire de courtes longueurs d'onde montrent un coefficient de pente ( $m$ ) nettement supérieur aux modèles GEM10 et GEM15 tout en ayant une RMSE près de deux fois moins élevée. La différence est légèrement plus faible pour les autres variables, mais comme le montre le tableau précédent, les meilleures valeurs sont obtenues par le modèle GEM-LAM. Le climat continental de ce site présente des précipitations plus faibles qu'au Mont Fidelity, ce-dernier étant situé à l'intérieur d'un climat transitionnel très humide où les précipitations sont abondantes. Le développement de systèmes de tempête dans ce type de climat

peut parfois être difficile à prévoir et conséquemment à modéliser, contrairement à un climat comme celui retrouvé à Marmot Basin.

La figure suivante présente l'analyse des données de précipitation par classe d'intensité pour l'hiver 2013-2014 pour le site d'étude de Marmot Basin.



**Figure 6. Évaluation du biais (données modélisées - données observées) pour la variable d'intensité de précipitation pour l'hiver 2013-2014 au site d'étude de Marmot Basin.**

La surestimation dans les classes de forte intensité de précipitation est similaire à celle observée pour le site du Mont Fidelity. Toutefois, on remarque que le modèle GEM-LAM performe mieux que les modèles GEM10 et GEM15, ce qui est à l'opposé de ce qu'on observe pour le site précédent. Le site de Marmot Basin étant soumis à des précipitations moins fréquentes et intenses qu'au Mont Fidelity, la variabilité spatiale dans les conditions météorologiques est moins importante et pourrait expliquer ce résultat.

#### 4.4.3 Chic-Chocs

Les tableaux suivants présentent la comparaison entre les données météorologiques de référence et les données de réanalyses pour chacun des deux hivers pour le site d'étude des monts Chic-Chocs dans le Parc National de la Gaspésie au Québec.

Tableau 9. Paramètres statistiques des nuages de points issus de la comparaison entre données météorologiques modélisées et observées pour l'hiver 2013-2014 au site d'étude des monts Chic-Chocs (souligné: meilleure valeur parmi les 3 modèles météorologique). Variables présentées : température ( $T^{\circ}$ ), humidité relative (RH), radiation courte longueur d'onde (ISWR), radiation longue longueur d'onde (ILWR), vitesse du vent (WSpeed) et précipitation (PSUM).

Validation des données météorologique aux monts Chic-Chocs (2013-2014)												
	GEM10				GEM15				GEMLAM			
	<i>m</i>	<i>b</i>	$R^2$	RMSE	<i>m</i>	<i>b</i>	$R^2$	RMSE	<i>m</i>	<i>b</i>	$R^2$	RMSE
$T^{\circ}$	<u>0,99</u>	<u>2,59</u>	<u>0,95</u>	<u>2,93</u>	0,98	6,34	0,94	2,97	0,75	68,14	0,84	5,86
RH	0,57	0,25	0,48	<u>0,19</u>	<u>0,60</u>	<u>0,21</u>	<u>0,50</u>	<u>0,19</u>	0,53	0,31	0,32	0,22
ISWR	0,96	12,40	0,94	57,57	<u>0,99</u>	<u>6,66</u>	<u>0,98</u>	<u>30,68</u>	0,36	206,94	0,27	262,02
ILWR	0,85	35,67	0,93	18,89	<u>0,95</u>	<u>9,17</u>	<u>0,98</u>	<u>10,88</u>	0,67	109,34	0,69	50,93
WSpeed	0,15	4,28	0,18	3,70	0,16	<u>3,06</u>	<u>0,23</u>	<u>3,15</u>	<u>0,57</u>	11,44	<u>0,23</u>	12,16
PSUM	0,28	0,23	0,23	<u>0,55</u>	<u>0,34</u>	0,22	<u>0,27</u>	<u>0,55</u>	0,19	<u>0,17</u>	0,12	0,71

Tableau 10. Paramètres statistiques des nuages de points issus de la comparaison entre données météorologiques modélisées et observées pour l'hiver 2014-2015 au site d'étude des monts Chic-Chocs (souligné: meilleure valeur parmi les 3 modèles météorologique).

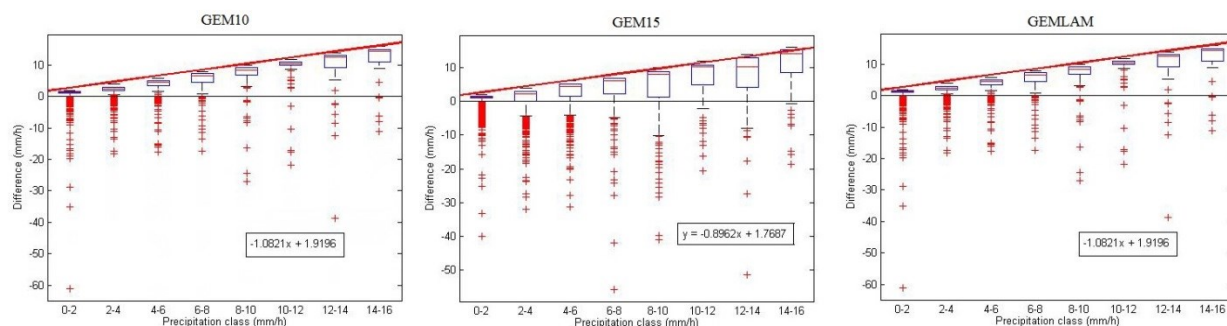
Validation des données météorologique aux monts Chic-Chocs (2014-2015)												
	GEM10				GEM15				GEMLAM			
	<i>m</i>	<i>b</i>	$R^2$	RMSE	<i>m</i>	<i>b</i>	$R^2$	RMSE	<i>m</i>	<i>b</i>	$R^2$	RMSE
$T^{\circ}$	<u>0,93</u>	<u>18,02</u>	<u>0,91</u>	3,32	<u>0,93</u>	19,90	<u>0,91</u>	<u>3,22</u>	0,85	44,98	0,84	6,55
RH	<u>0,92</u>	<u>-0,08</u>	0,48	0,20	<u>0,92</u>	-0,09	0,48	0,20	<u>0,92</u>	-0,09	<u>0,49</u>	0,21
ISWR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ILWR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WSpeed	0,31	3,26	0,37	3,32	0,25	<u>2,77</u>	0,33	<u>3,26</u>	<u>1,15</u>	9,05	<u>0,50</u>	11,58
PSUM	<u>0,32</u>	0,13	<u>0,48</u>	<u>0,37</u>	<u>0,32</u>	<u>0,12</u>	0,47	<u>0,37</u>	0,26	0,18	0,16	0,72

Contrairement à ce qui était attendu, les données GEM-LAM n'ont pas bien performé pour ce site d'étude, à l'exception de la variable de vitesse du vent. L'hypothèse principale pouvant expliquer ces résultats réfère à la méthode d'acquisition de ces données. Les données GEM-LAM pour ce site ont été acquises à l'été 2015 des suites d'une remodelisation par le CMC. Contrairement aux données GEM10, GEM15 et GEM-LAM (des 2 autres sites d'études), ce jeu de données de prévision ne comprend qu'une seule modélisation par jour versus deux pour les autres. Cet aspect est non-négligeable dans l'analyse des résultats, car la seconde modélisation qui a lieu en après-midi chaque jour venait très souvent corriger le tir de la modélisation matinale. Puisque ce jeu de donnée a été acquis via une remodelisation par le CMC et que ces



derniers ne produisaient plus les variables de radiation solaire, l'analyse pour celles-ci n'a pas été effectuée.

La figure suivante présente une évaluation du biais (donnée modélisée – donnée observée), pour chaque modèle, de la variable de précipitation lorsque celle-ci est séparée en classe d'intensité de précipitation. Les données de précipitation pour les deux hivers combinés ont été utilisées pour cette analyse.



**Figure 7. Évaluation du biais (données modélisées - données observées) pour la variable d'intensité de précipitation pour les hivers 2013-2014 et 2014-2015 au site d'étude des monts Chic-Chocs.**

Les trois modèles météorologiques montrent ici une surestimation similaire l'une par rapport aux autres plus la classe d'intensité de précipitation est élevée. Cette surestimation va dans le même sens que ce qui a été observé aux autres sites d'études.

#### 4.4.4 Sommaire

Les tableaux suivants résument les performances annuelles de chacun des modèles météorologiques à chacun des sites d'études.

**Tableau 11. Sommaire des performances des modèles météorologiques pour l'hiver 2013-2014 (« x » indique le modèle ayant eu la meilleure performance pour la variable en question)**

Sommaire des performances des modèles météorologiques par sites (2013-2014)									
	Mt. Fidelity			Marmot Basin			Chic-Chocs		
	GEM10	GEM15	GEMLAM	GEM10	GEM15	GEMLAM	GEM10	GEM15	GEMLAM
$T^{\circ}$	x	x				x		x	
$RH$			x	x		x		x	
$ISWR$			x			x		x	
$ILWR$			x			x		x	
$Wspeed$			x	x					x
$PSUM$	x	x	x			x		x	

**Tableau 12. Sommaire des performances des modèles météorologiques pour l'hiver 2014-2015 (« x » indique le modèle ayant eu la meilleure performance pour la variable en question, « \ » indique une absence de données)**

<b>Sommaire des performances des modèles météorologiques par sites (2014-2015)</b>								
<i>Mt. Fidelity</i>			<i>Marmot Basin</i>			<i>Chic-Chocs</i>		
GEM10	GEM15	GEMLAM	GEM10	GEM15	GEMLAM	GEM10	GEM15	GEMLAM
<i>T°</i>	<b>x</b>					<b>x</b>		
<i>RH</i>		<b>x</b>						<b>x</b>
<i>ISWR</i>	<b>x</b>							
<i>ILWR</i>	<b>x</b>							
<i>Wspeed</i>	<b>x</b>							<b>x</b>
<i>PSUM</i>		<b>x</b>				<b>x</b>		

Il est à noter que le choix d'un modèle pour certains paramètres météorologique dans ce sommaire fut parfois difficile en raison de la parité que peuvent avoir les modèles entre eux. Le choix fut également basé sur la performance lors des simulations. Il est important de préciser que malgré la précision supérieure d'un paramètre d'un modèle par rapport à un autre, son impact peut être négligeable sur la sortie du modèle *SNOWPACK*. En effet, *SNOWPACK* est très sensible à certains paramètres (ex. : précipitations) et moins à d'autres (ex. : vitesse du vent, à l'exception des cas extrêmes). C'est donc dire que malgré de meilleurs résultats statistiques, un modèle peut être moins performant qu'un autre pour un même site d'études si les variables les plus importantes ont une précision inférieure. Par exemple, les simulations seront influencées grandement par les taux de précipitations utilisés en intrant. À l'inverse, la direction du vent aura un impact plus discret sur les résultats considérant les vents plutôt modérés des zones d'études.

#### **4.5 Simulations *SNOWPACK***

Cette section présente les résultats des analyses faites sur les sorties importantes du modèle *SNOWPACK* dans un contexte de prévention d'avalanches. La sortie de hauteur de neige est tout d'abord analysée par rapport aux données de référence à chacun des sites. Les valeurs de densité relative moyenne et de température relative moyenne simulées sont par la suite comparées aux valeurs observées sur le terrain. Finalement, l'évaluation qualitative de la simulation de couches critiques dans le couvert est présentée.

## 4.5.1 Évaluation de la précision des simulations

### 4.5.1.1 Hauteur de neige

La disponibilité de mesures de hauteur de neige (HN) pour les sites du Mont Fidelity et des monts Chic-Chocs a permis d'effectuer une comparaison entre les HN simulées par *SNOWPACK* et les HN réelles observées sur le terrain. Les valeurs de HN au Mont Fidelity ont été relevées manuellement par un technicien en avalanche de Parcs Canada alors que les données des Chic-Chocs ont été acquises via un capteur monté sur une station de mesures automatiques.

#### Mont Fidelity

Les figures suivantes présentent, pour les deux hivers du projet, une comparaison entre les HN extraites des sorties du modèle *SNOWPACK* et les données mesurées sur le terrain.

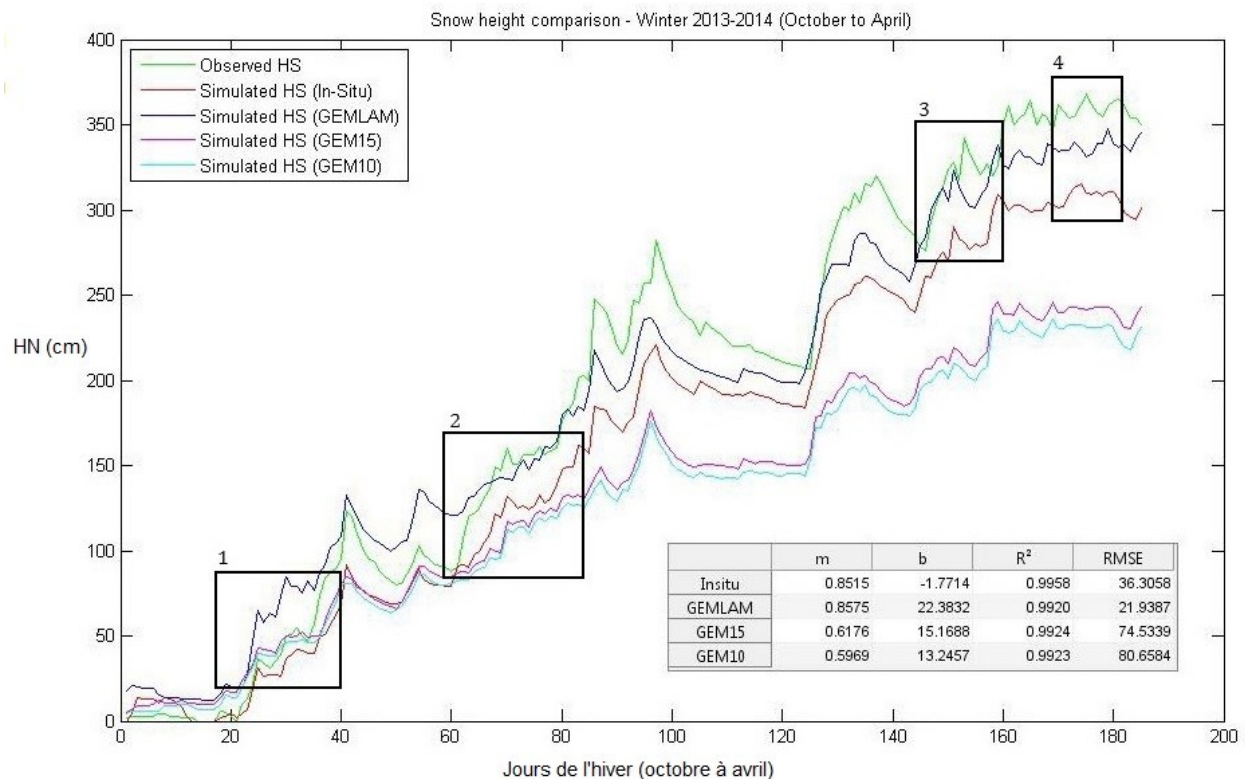
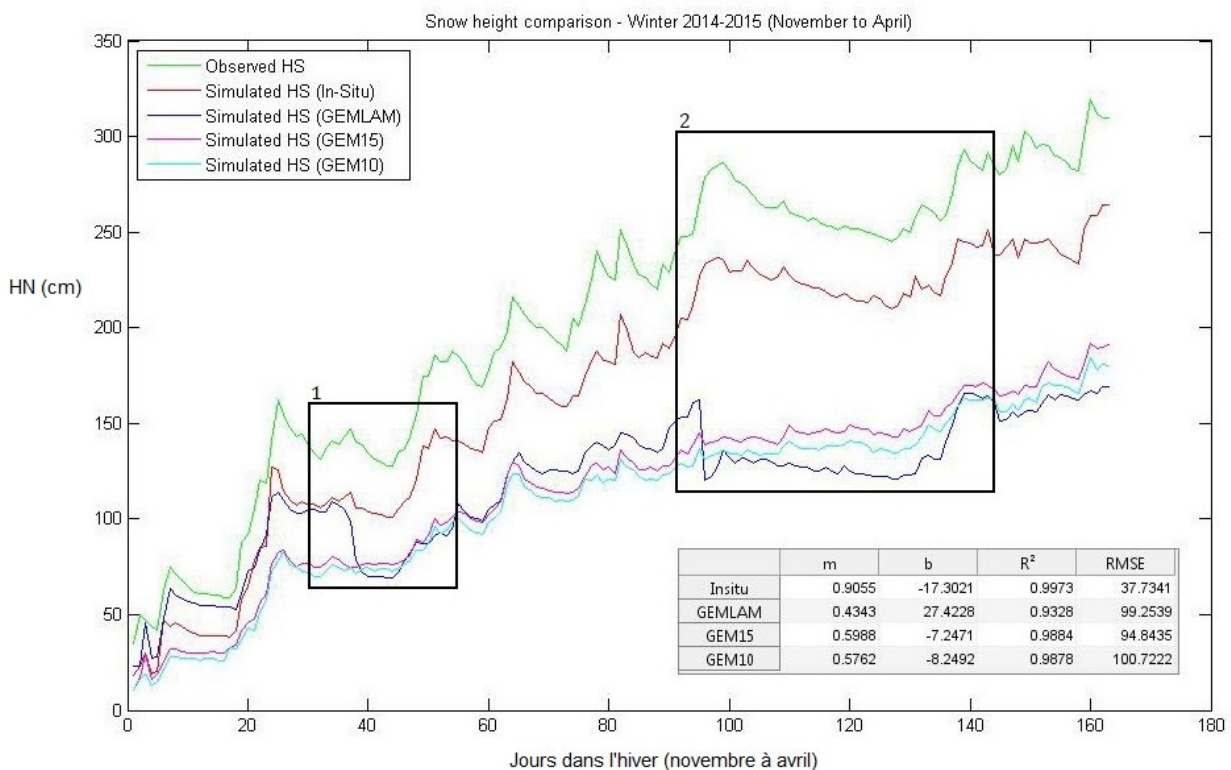


Figure 8. Analyse des hauteurs de neige simulées par rapport aux données observées pour l'hiver 2013-2014 au site d'étude du Mont Fidelity.

On observe que pour 2013-2014, la simulation avec les données in-situ présente tout au long de l'hiver une HN simulée inférieure aux données observées. Les HN simulées à partir des données GEM-LAM sont supérieures aux données observées en début de saison (encadré no.1) jusqu'à

une importante accumulation de neige entre les 60<sup>e</sup> et 80<sup>e</sup> jours de la simulation (encadré no.2). Cette accumulation n'a pu être modélisée correctement par le modèle GEM-LAM. À l'opposé, on observe à l'intérieur des encadrés no.3 et no.4 une augmentation dans les HN observées contrairement à des épisodes de fontes ou de tassement pour les données simulées. Cette différence pourrait être le résultat d'une modélisation incorrecte des processus de métamorphose de la neige par *SNOWPACK* pour ces intervalles temporels. Finalement, les données GEM10 et GEM15 sont quant à elles beaucoup moins performantes que les données GEM-LAM avec une erreur sur les mesures d'environ 40% (voir pente  $m$  dans le tableau de la figure-8).



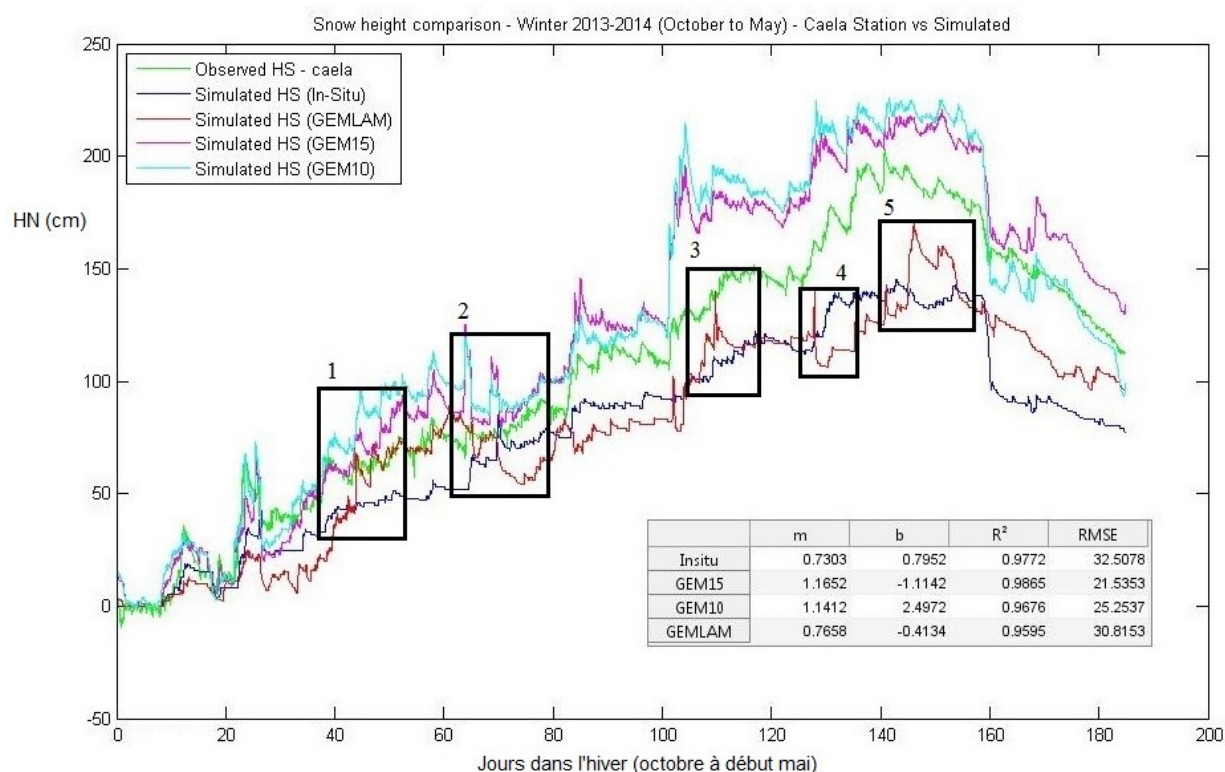
**Figure 9. Analyse des hauteurs de neige simulées par rapport aux données observées pour l'hiver 2014-2015 au site d'étude du Mont Fidelity.**

Pour l'hiver 2014-2015, on observe deux épisodes de fonte exagérés dans les simulations avec les données GEM-LAM (encadrés no.1 et no.2). Ces deux épisodes de fonte sont reliés à des événements de pluie successifs qui ont eu lieu au début du mois de décembre et à la fin du mois de janvier. On remarque dans les données observées que la hauteur du couvert de neige a chuté quelque peu suite à ces événements en raison de l'effet de la percolation de l'eau dans la neige et des températures plus chaudes. Les données GEM-LAM ont, de manière générale, correctement

modélisé ces précipitations. Tout comme pour l'hiver 2013-2014, le modèle *SNOWPACK* semble avoir exagéré la fonte reliée à ces évènements de pluie.

### Chic-Chocs

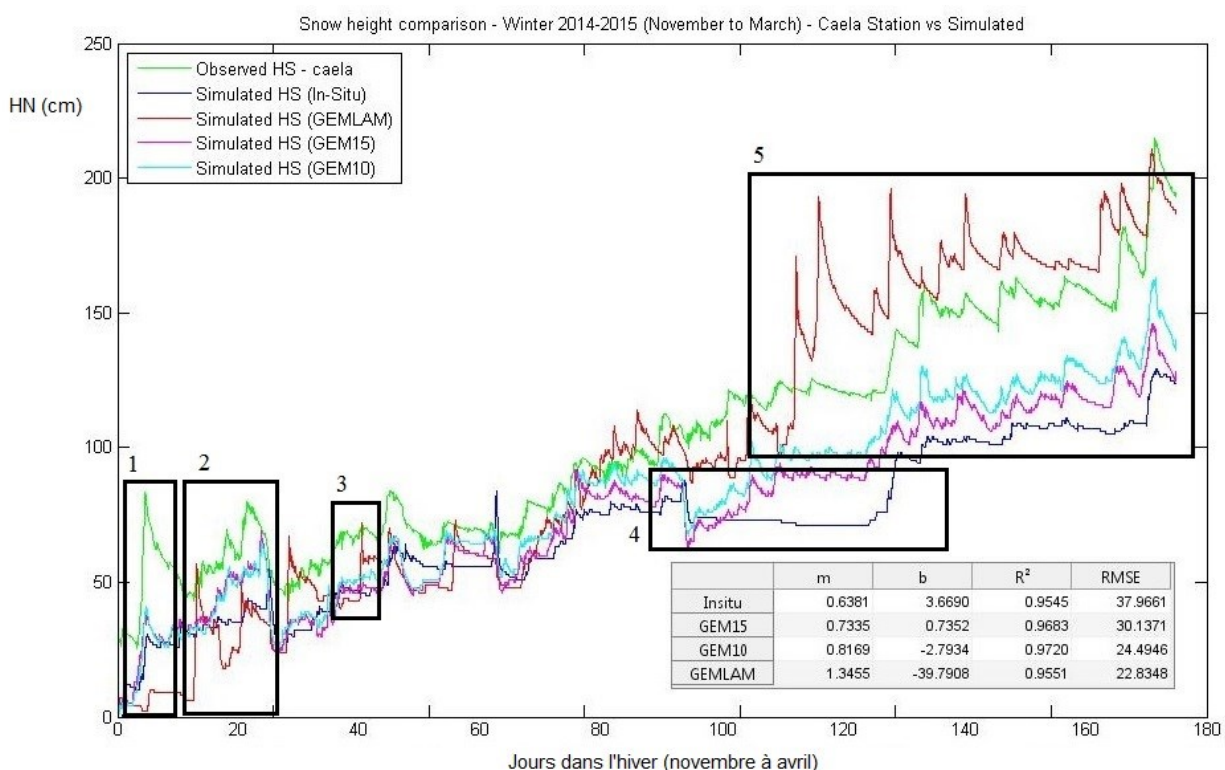
Les figures suivantes présentent, pour les deux hivers du projet, une comparaison entre les HN extraites des sorties du modèle *SNOWPACK* et les données mesurées sur le terrain pour le site d'études des monts Chic-Chocs.



**Figure 10. Analyse des hauteurs de neige simulées par rapport aux données observées pour l'hiver 2013-2014 au site d'étude CAELA des monts Chic-Chocs.**

La tendance générale de cette portion d'analyse montre une surestimation des HN tout au long de l'hiver pour les données de réanalyses GEM10 et GEM15, et une sous-estimation des HN pour les simulations faites à partir de données in-situ et avec les données GEM-LAM. D'un point de vue statistique, les simulations GEM10 et GEM15 présentent les meilleurs coefficients de pente, les meilleurs indices de corrélation et les plus faibles erreurs quadratiques moyennes. Les simulations in-situ et GEM-LAM sont très semblables d'un point de vue statistique. Le principal écart avec les données observées pour la simulation GEM-LAM est le résultat d'une mauvaise simulation d'un évènement de précipitation (encadré no.1, no.3 et no.5) et d'une mauvaise

modélisation par *SNOWPACK* d'un évènement de fonte (encadré no.2 et no.4). Tel que mentionné dans la section sur l'analyse des données météorologiques, les données GEM-LAM acquises via la remodelisation par le CMC présentent un écart considérable avec les données de station météorologique sur le site d'étude. Cet écart se manifeste assez visiblement dans la présente analyse.



**Figure 11. Analyse des hauteurs de neige simulées par rapport aux données observées pour l'hiver 2014-2015 au site d'étude des monts Chic-Chocs.**

Il est difficile pour l'hiver 2014-2015 de déterminer laquelle des simulations a présenté les meilleurs résultats pour la totalité de l'hiver. En début de saison, la simulation GEM-LAM semble celle qui présente le plus grand écart de HN avec les données observées. L'encadré no.1 présente d'ailleurs l'absence de modélisation d'une précipitation majeure dans les données GEM-LAM. À l'opposé, les encadrés no.2 et no.3 montrent des précipitations modélisées de manière exagérée dans les données GEM-LAM. Les simulations avec les données GEM10 et GEM15 sont celles qui sont les plus constantes par rapport aux données observées. Elles sous-estiment toutefois de plus en plus la HN plus l'hiver avance. Entre les encadrés no.3 et no.4, tous les types de données performement de manière similaire dans la représentation de la hauteur de

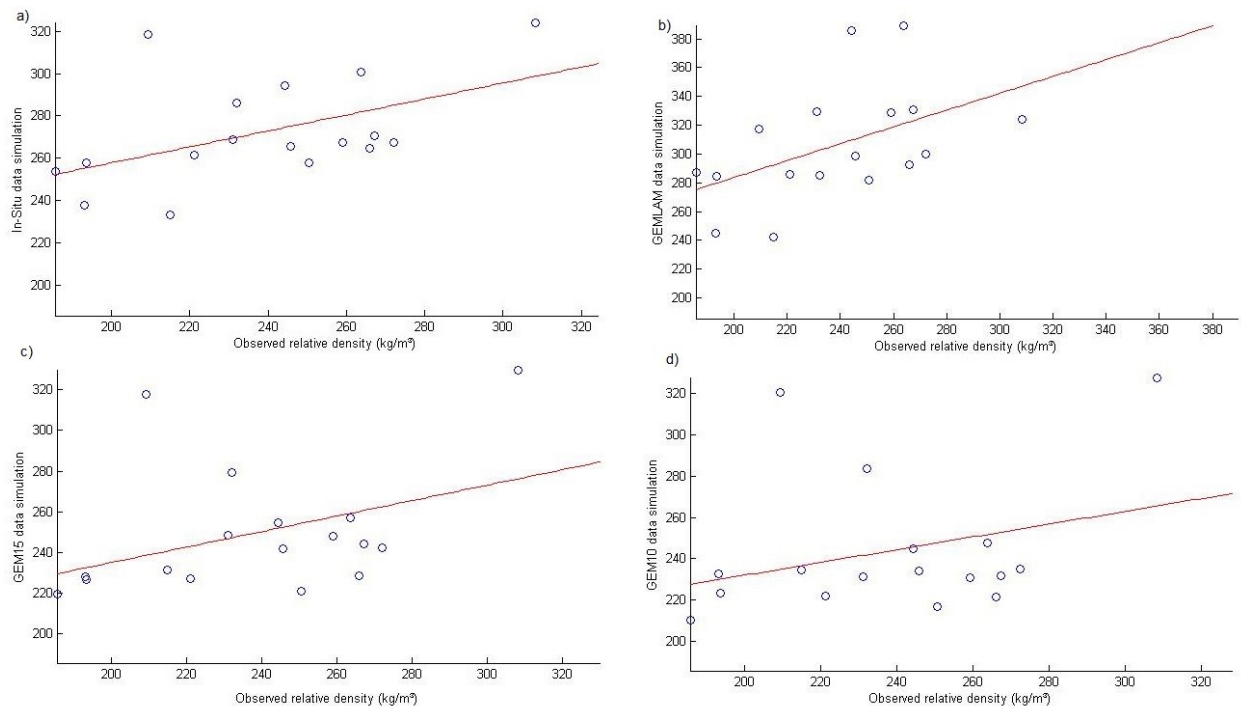


neige au site d'étude. L'encadré no.4 présente toutefois ce qui semble être un problème relié à l'instrument de mesure des précipitations, alors qu'aucune accumulation de neige n'a été enregistrée dans les données brutes. Finalement, l'encadré no.5 présente une modélisation erronée d'un évènement de précipitation de neige dans les données GEM-LAM. Suivant cet évènement, les simulations avec les données GEM-LAM ont toutefois relativement bien performé, comme en fait foi la similitude dans les variations des HN simulés et observés dans l'encadré no.5.

#### 4.5.1.2 Densité relative moyenne

##### Mont Fidelity

La figure et le tableau suivant montrent la relation entre les densités relatives moyennes simulées et observées pour le site du Mont Fidelity pour les deux hivers combinés et pour chacune des données météorologiques de réanalyses.



**Figure 12. Analyse de la densité relative moyenne pour les hivers 2013-2014 et 2014-2015 au site d'étude du Mont Fidelity.**  
**(a) données in-situ, (b) données GEM-LAM, (c) données GEM15, (d) données GEM10**

**Tableau 13. Paramètres statistiques associés aux nuages de points de l'analyse de la densité relative moyenne 2013-2015 au site d'étude du Mont Fidelity.**

<b>Densité relative moyenne</b>				
	$m$	$b$	$R^2$	$RMSE$
In-situ	0,377	182,379	0,499	5,804
GEM-LAM	0,586	166,496	0,483	8,223
GEM15	0,381	158,904	0,396	3,326
GEM10	0,310	170,059	0,300	2,298

La simulation avec les données GEM-LAM présente ici les meilleurs résultats avec une marge d'erreur d'un peu plus de 40%, mais en concédant un peu de précision au niveau de l'erreur quadratique moyenne. Cette dernière est toutefois négligeable vu son ordre de grandeur par rapport aux mesures (moins de 5%). Considérant le fait que le modèle *SNOWPACK* sous-estime la taille des grains de neige (Langlois *et al.*, 2012; 2009), les simulations présenteront des couches de neige plus denses que ce que l'on peut retrouver en réalité. Une simulation précise des densités est primordiale dans un contexte de prévision d'avalanche. La formation de couches de neige, leur importance et leur position dans la stratigraphie du couvert neigeux fait en sorte qu'une couche peut être identifiée comme faible et favoriser un plan de glissement. L'erreur mentionnée plus haut pour les simulations est dans un ordre de grandeur pouvant être jugé acceptable. Toutefois, il s'agit ici d'une valeur de densité pour l'ensemble du couvert neigeux et non pour une seule couche; il est donc nécessaire pour le prévisionniste d'apporter un jugement personnel sur les valeurs observées dans les simulations.

### Chic-Chocs

L'analyse des densités relatives moyennes pour le site d'étude des monts Chic-Chocs a seulement pu être réalisée pour l'hiver 2014-2015. De plus, les données terrains auxquelles nous avons accès de la part de nos partenaires ont été récoltées selon un processus qui n'inclut pas la mesure de densité pour chacune des couches. L'échantillon de données pour cette analyse étant donc très faible (4 puits de neige seulement avec données de densité), les résultats qui y sont associés deviennent difficiles à interpréter et par conséquent ces résultats ne sont pas présentés dans ce document. Toutefois, malgré le faible échantillon, il est possible d'observer la tendance auquel on devrait s'attendre par rapport aux données utilisées : les densités provenant des simulations à partir des données in-situ ont présenté les meilleures valeurs par rapport aux



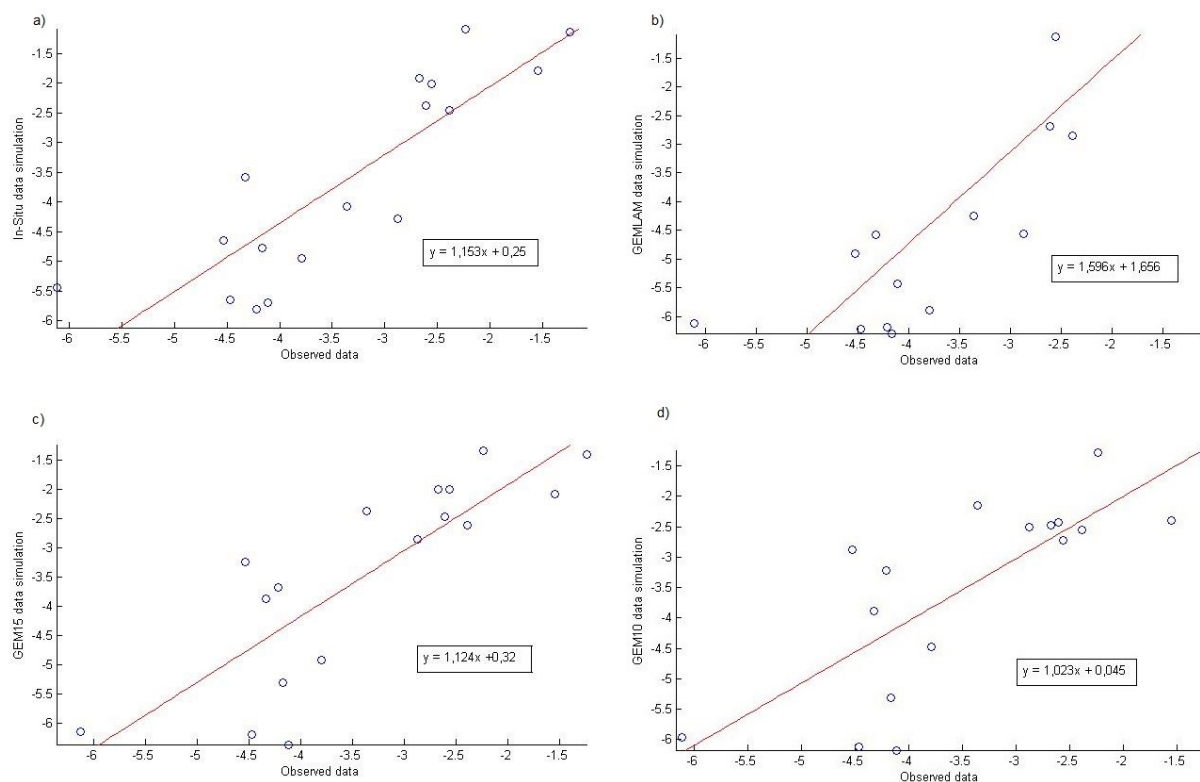
simulations avec les données de densité observées sur le terrain. Parmi les simulations avec les données provenant des modèles météorologiques, les données GEM-LAM ont été les plus performantes.

#### ***4.5.1.3 Température relative moyenne***

Une analyse de la température relative moyenne a également été réalisée pour les hivers 2013-2014 et 2014-2015 combinés afin d'évaluer la capacité du modèle à représenter efficacement la température interne du couvert neigeux qui gouverne le métamorphisme des grains de neige. Cette étape consiste, tout comme pour la densité, à obtenir une valeur de température pondérée pour la totalité du profil vertical de neige. Cette valeur, bien que non représentative du gradient de température, permet de comparer d'une manière générale la température à l'intérieur du couvert neigeux simulé et observé.

#### **Mont Fidelity**

La figure et le tableau suivant présentent les résultats de l'analyse des températures relatives moyennes du couvert neigeux aux dates de récolte de données terrain pour les hivers 2013-2014 et 2014-2015 du projet au site d'étude du Mont Fidelity.



**Figure 13. Analyse de la température relative moyenne pour les hivers 2013-2014 et 2014-2015 au site d'étude du Mont Fidelity. (a) données in-situ, (b) données GEM-LAM, (c) données GEM15, (d) données GEM10**

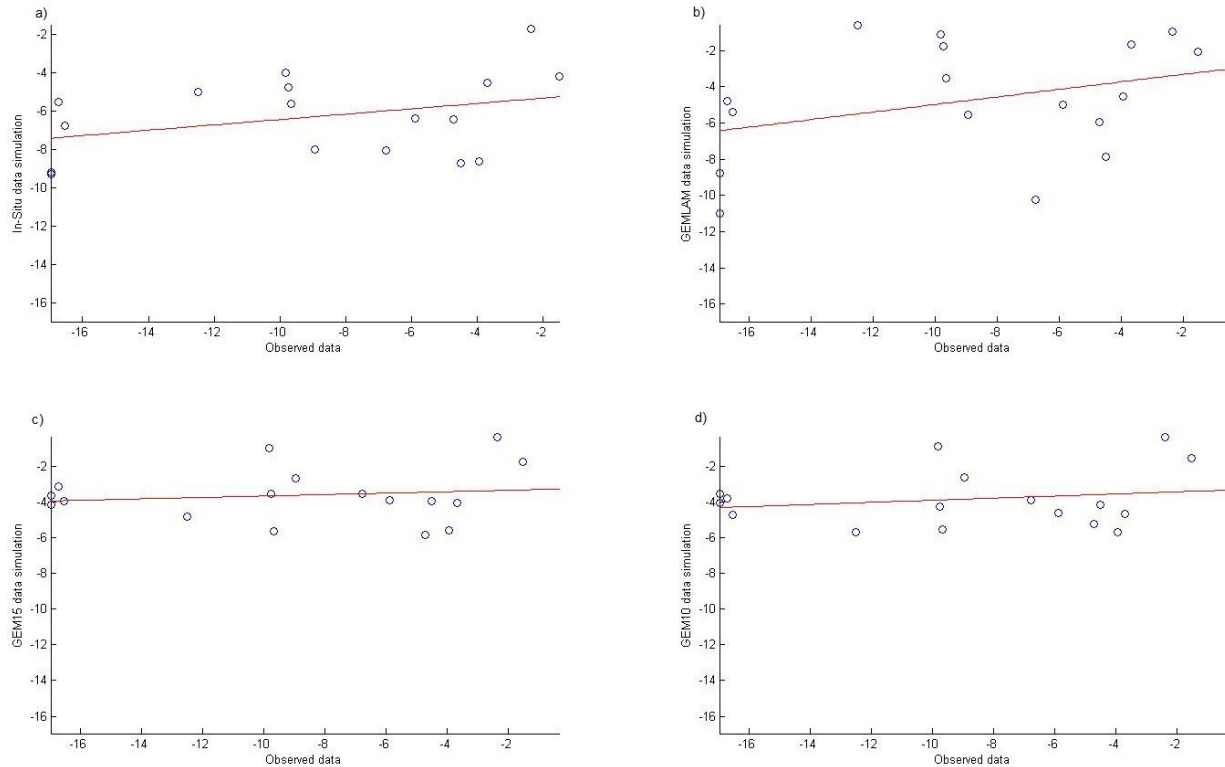
**Tableau 14. Paramètres statistiques associés aux nuages de points de l'analyse de la température relative moyenne 2013-2015 au site d'étude du Mont Fidelity.**

Température relative moyenne				
	$m$	$b$	$R^2$	$RMSE$
In-situ	1,153	0,250	0,856	0,513
GEM-LAM	1,596	1,656	0,862	0,591
GEM15	1,124	0,320	0,824	0,311
GEM10	1,023	0,045	0,788	0,183

Les simulations effectuées avec les données GEM10 présentent pour cette analyse les meilleurs résultats. Toutefois, les données GEM-LAM présentent la meilleure corrélation entre températures relatives moyennes simulées et observées.

### Chic-Chocs

La figure et le tableau suivant présentent les résultats de l'analyse des températures relatives moyennes du couvert neigeux aux dates de récolte de données terrain pour les hivers 2013-2014 et 2014-2015 du projet au site d'étude des monts Chic-Chocs.



**Figure 14. Analyse de la température relative moyenne pour les hivers 2013-2014 et 2014-2015 au site d'étude des monts Chic-Chocs. (a) données in-situ, (b) données GEM-LAM, (c) données GEM15, (d) données GEM10**

**Tableau 15. Paramètres statistiques associés aux nuages de points de l'analyse de la température relative moyenne 2013-2015 au site d'étude des monts Chic-Chocs.**

Température relative moyenne				
	$m$	$b$	$R^2$	$RMSE$
In-situ	0,139	-5,056	0,350	1,613
GEM-LAM	0,208	-2,893	0,344	2,038
GEM15	0,040	-3,260	0,141	2,298
GEM10	0,059	-3,306	0,196	2,251

Les résultats montrent une très faible corrélation entre les températures relatives moyennes simulées et observées, particulièrement pour les simulations à partir des données de réanalyses

GEM10 et GEM15. Certaines des données observées sont biaisées par la nature du sol sur lequel elles ont été récoltées. En effet, des 17 puits de neige réalisés lors des deux hivers du projet, 5 de ceux-ci ont été réalisés sur des affleurements rocheux, influençant du même coup de manière importante le profil de température présent dans le couvert neigeux. La présence d'un affleurement rocheux sous le couvert neigeux rend la base de ce dernier plus froide que si elle était sur une surface plus homogène. En effet, les affleurements rocheux permettent une circulation d'air à l'intérieur de ceux-ci, ce qui refroidit considérablement la base du couvert neigeux. Les simulations *SNOWPACK* ayant été réalisées de manière identique pour tous les sites d'études, c'est-à-dire en considérant une surface homogène comme sol, la présence de d'affleurement rocheux n'a pas donc pas été prise en compte. Le tableau 15 montre les résultats obtenus avec le retrait de ces 5 puits de neige.

**Tableau 16. Paramètres statistiques associés aux nuages de points de l'analyse de la température relative moyenne (sans les profils sur talus rocheux) 2013-2015 au site d'étude des monts Chic-Chocs.**

<b>Température relative moyenne</b>				
	<i>m</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>RMSE</i>
In-situ	0,108	-5,283	0,149	0,188
GEM-LAM	0,040	-3,945	0,041	1,335
GEM15	0,060	-3,120	0,101	1,576
GEM10	0,081	-3,137	0,132	1,532

Des suites de ce filtrage, l'erreur quadratique moyenne sur la température relative moyenne s'est vue abaissée d'environ 0,7°C. Toutefois, l'indice de corrélation a été affecté négativement par ce retrait, montrant une valeur plus faible pour tous les types donnés.

#### **4.5.1.4 Structure du couvert neigeux**

Afin d'évaluer la performance générale du modèle *SNOWPACK* à modéliser efficacement la stratigraphie du couvert neigeux, principalement la présence de croûtes de glaces, une attention particulière est portée ici à la réaction du modèle à des événements de pluie spécifiques. Dans le cadre de ce rapport, une analyse d'événements de pluie de début de saison pour l'hiver 2014-2015 aux sites d'études du Mont Fidelity et des monts Chic-Chocs a été réalisée. Pour cette analyse, les données in-situ ont été utilisées comme données de forçage dans *SNOWPACK*.

### Mont Fidelity

L'hiver 2014-2015 fut marqué par deux épisodes de pluies et un épisode de fonte en début/milieu de saison qui ont laissés dans le couvert neigeux des croûtes de glaces persistantes jugées sensibles pour 2 raisons principales : 1) elles favorisent un plan de glissement pour les couches sus-jacentes et 2) elles favorisent le métamorphisme des grains sur et sous la couche. Le tableau suivant présente brièvement ces trois événements à partir des données in-situ utilisées pour les simulations.

**Tableau 17. Présentation des événements de pluie en début de saison au site d'étude du Mont Fidelity pour l'hiver 2014-2015.**

Date début	Date fin	Précipitation (mm/h moyen)	Pointe de précipitation (mm/h)	Précipitation totale (mm)	T° moyenne (°C)	T° maximale (°C)
06-11-2014 01:00	07-11-2014 16:00	0,83	2,65	33,00	0,73	2,09
10-12-2014 11:00	12-12-2014 00:00	0,37	1,49	14,10	0,24	1,51
25-01-2014 03:00	27-01-2015 17:00	0,05	1,00	2,99	0,91	3,32

La figure présente la modélisation *SNOWPACK* à partir de ces mêmes données météorologiques (données météorologiques in-situ). La figure montre deux sorties de la simulation avec les données in-situ : la sortie de type de grain (en haut) et de taille des liens (en bas) entre les grains de neige. Le paramètre de la taille des liens est utile pour l'observation de croûtes dans le couvert neigeux.

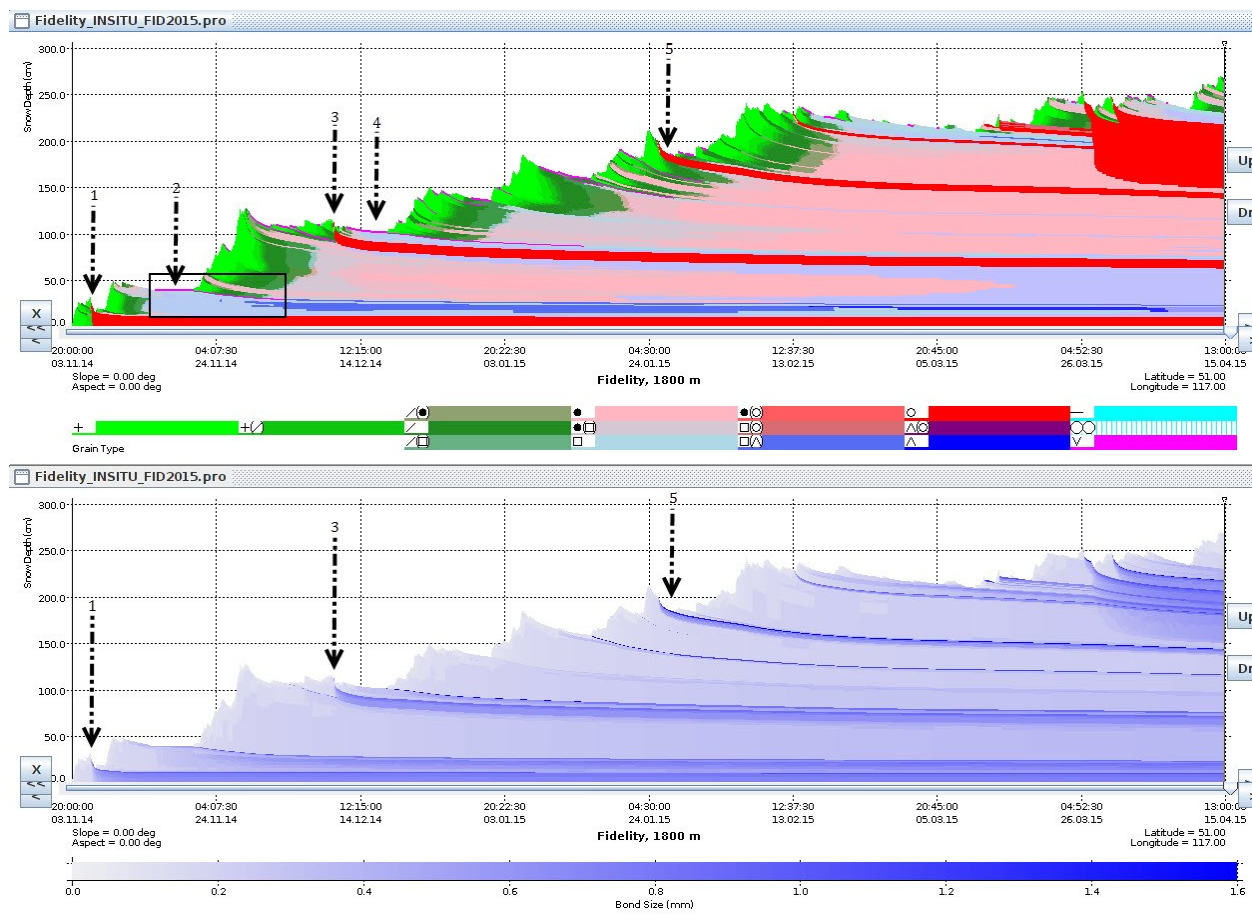


Figure 15. Sortie *SNOWPACK* de types de grain de neige et de taille de lien entre eux pour l'hiver 2014-2015 au site d'étude du Mont Fidelity.

L'évènement du 6 novembre a laissé à la base du couvert neigeux une succession de croûtes laminées de glace (flèche no.1, couche en rouge). Ce laminé de croûtes a été classifié comme couche faible persistante par plusieurs opérations de prévention d'avalanches sur *InfoEX*. Elle a été recensée comme étant active jusqu'à la mi-décembre 2014 par la majorité de ces opérations avant d'être classifiée dormante en raison de l'épaisseur du couvert neigeux et de la présence d'autres croûtes au-dessus d'elle. Suivant cet épisode pluvieux, des journées claires et froides ont suivis et menées à la formation de givre de surface (flèche no.2, couche mince en magenta) vers le 15 novembre. Cette couche de givre a été recensée active sur *InfoEX* à partir du 21 novembre à la suite de précipitations de neige qui l'ont ensevelie et ont ainsi rendue fragile le couvert neigeux. L'évènement du 10 décembre (flèche no.3, couche en rouge) a quant à lui commencé à poser problème environ une semaine après la précipitation. Les données *InfoEX* recensent une formation de givre de surface sur les croûtes laminées formées par cette précipitation (flèche

no.4, couche mince en magenta), créant ainsi une surface très fragile et propice au déclenchement d'avalanches. La flèche no.5 pointe quant à elle le redoux ayant formé une croûte de regel (couche en rouge) dans le couvert neigeux. Cette croûte a été recensée en développement à partir du 31 janvier et active à partir du 3 février sur *InfoEX*. La majorité des opérations l'ont recensé active jusqu'au 13 février, où un autre redoux a eu lieu et a créé une petite croûte de regel près de la surface du couvert neigeux. Certaines opérations l'ont toutefois laissée active jusqu'à l'épisode de fonte important qui a pris place à la fin du mois de mars.

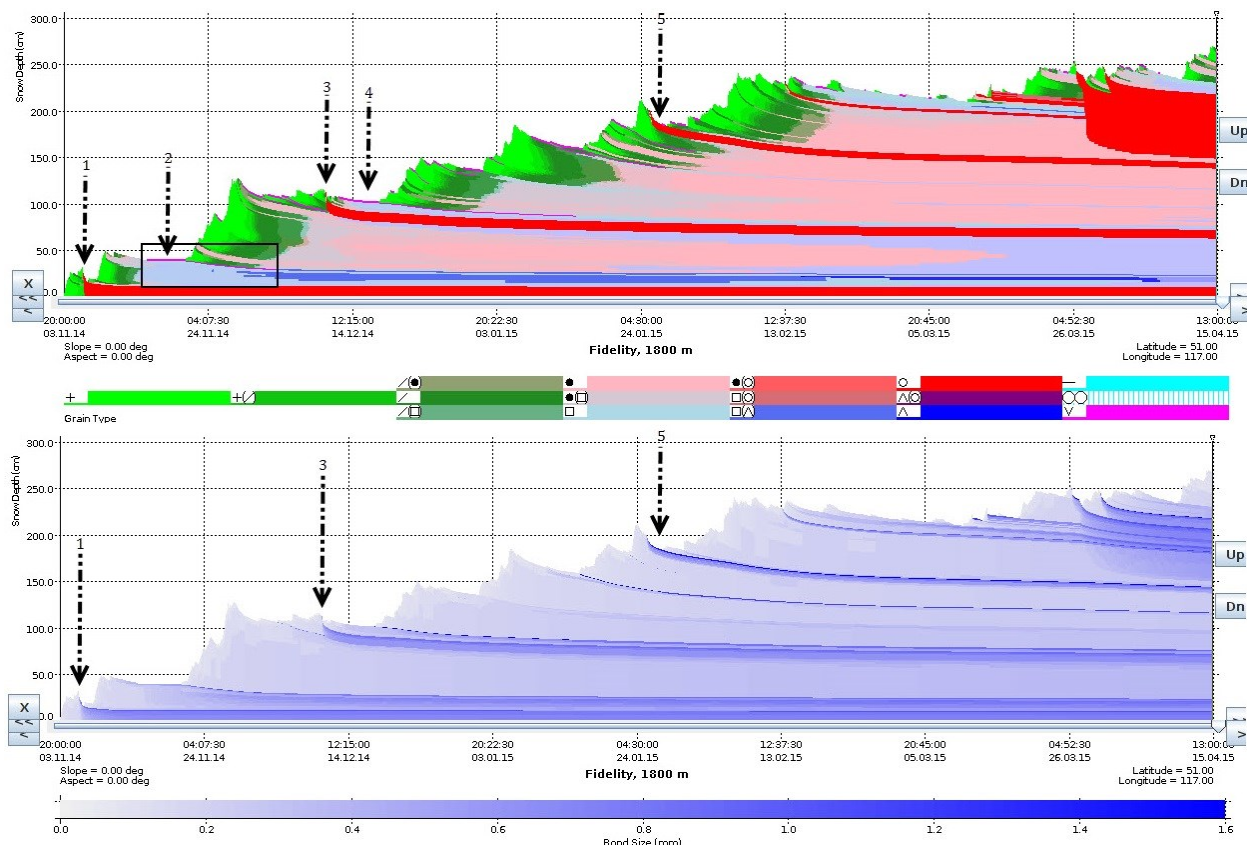
### Monts Chic-Chocs

Les monts Chic-Chocs ont été hôtes de quatre événements de pluie ayant laissé dans le couvert neigeux des croûtes de regel importantes. Ces quatre événements sont présentés dans le tableau suivant.

**Tableau 18. Présentation des événements de pluie en début de saison au site d'étude des monts Chic-Chocs pour l'hiver 2014-2015.**

Date début	Date fin	Précipitation (mm/h moyen)	Pointe de précipitation (mm/h)	Précipitation totale (mm)	T° moyenne (°C)	T° maximale (°C)
24-11-2014 12:00	26-11-2014 03:00	0,48	4,50	19,10	2,09	6,73
12-12-2014 11:00	13-12-2014 21:00	0,42	4,10	14,60	1,56	4,83
24-12-2014 21:00	25-12-2014 19:00	1,67	6,30	38,30	2,72	7,09
19-01-2015 07:00	20-01-2015 02:00	0,38	1,30	7,60	1,04	1,71

La figure suivante présente les sorties *SNOWPACK* des types de grain et de la taille des liens entre ceux-ci. La simulation a été réalisée avec les données météorologiques in-situ. Ces mêmes données ont été utilisées pour résumer les événements pluvieux dans le tableau précédent.



**Figure 16. Sortie *SNOWPACK* de types de grain de neige et de taille de lien entre eux pour l'hiver 2014-2015 au site d'étude des monts Chic-Chocs.**

Le premier évènement de pluie (flèche no.1) a eu lieu en début de saison alors que le couvert neigeux n'était pas très épais (moins de 50 cm). Cet évènement a eu lieu avant le début des opérations de prévention d'avalanche dans les Chic-Chocs, ce qui explique, avec la faible épaisseur du couvert neigeux à ce moment, l'absence de recensement de cette couche dans *InfoEX*. La succession de croûtes laminées qui en a résulté (épaisse couche rouge au bas du couvert neigeux dans la figure-16) a toutefois été observée lors des campagnes terrains. Le second évènement de pluie (flèche no.2) a formé une deuxième croûte de regel majeure. Cette croûte est mentionnée dans les données *InfoEX*, mais n'est pas recensée comme couche faible persistante en raison de la faible épaisseur du couvert neigeux et de l'absence de neige au-dessus. Le troisième évènement (flèche no.3) est cependant venu complexifier la structure verticale du couvert neigeux. Cet évènement de pluie forte a créé une croûte qui, selon les caractéristiques spatiales des sites d'observation, s'est fusionnée par endroit avec celle du 12 décembre (figure-17). On observe dans la structure du couvert neigeux des deux sites de la figure-17 une différence au niveau de la base de la structure verticale; la pluie a percolé dans le couvert



neigeux jusqu'au sol au site #2 tandis qu'elle n'a pas atteint les 20 centimètres inférieurs au site #1.

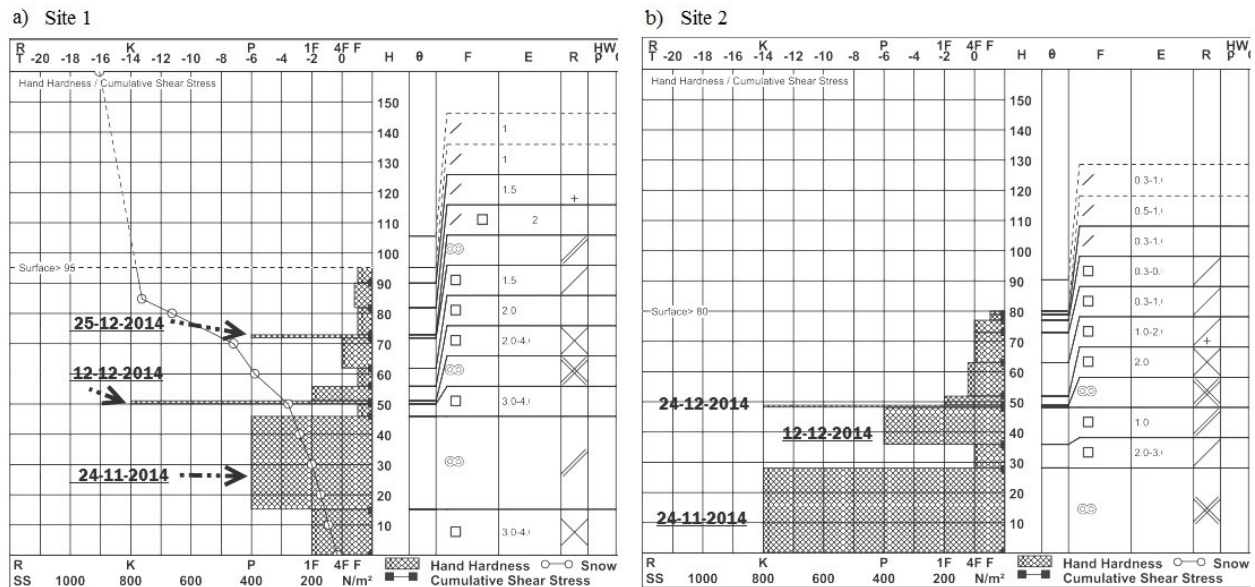


Figure 17. Profils stratigraphiques récoltés au site d'étude des monts Chic-Chocs durant le mois de janvier 2015.

À pareille date, la simulation *SNOWPACK* (figure-18) montre une structure similaire à celle du site #2 avec une fusion pratiquement complète entre les croûtes du 12 et 24 décembre 2014 (en rouge rayé). La croûte du 25 décembre a été recensée active sur *InfoEX* par la principale opération de prévention d'avalanche des Chic-Chocs (Avalanche Québec) à partir du 29 décembre et jusqu'au 25 janvier. Certaines opérations situées plus à l'intérieur des terres ont toutefois catégorisé cette croûte comme étant active jusqu'au début du mois de mars.

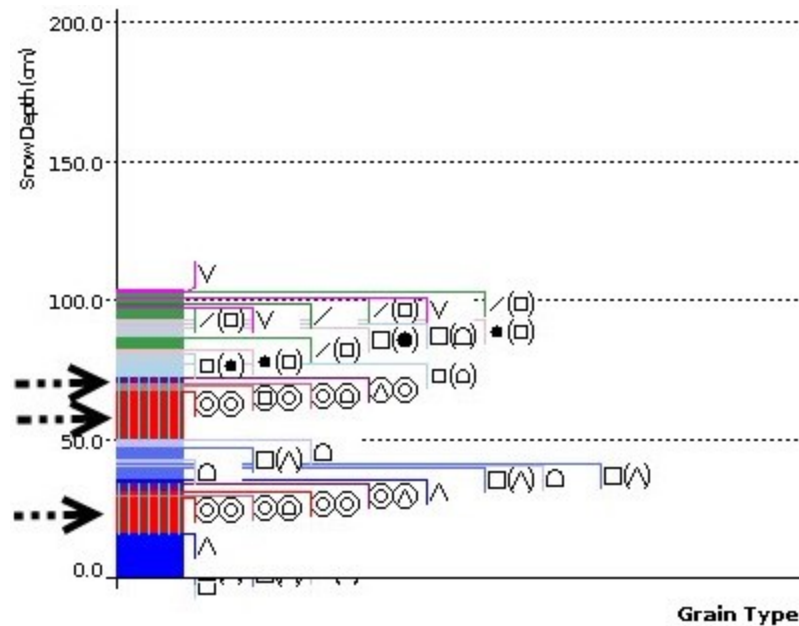


Figure 18. Sortie *SNOWPACK* de types de grain de neige extrait à la fin du mois de janvier (25 janvier 2015) pour le site d'étude des monts Chic-Chocs.

Le dernier évènement de pluie notable fut celui du 19 janvier 2015 (flèche no.4). Moins important que les deux précédents, il fut tout de même recensé par les opérations sur *InfoEX*. Cet évènement résulta en la formation d'une croûte de regel qui fut recensée en développement à partir du 2 février 2015. Les différentes opérations ont toutefois changé son état pour *dormante* peu de temps après en raison de la stabilité des couches de neige au-dessus de celle-ci, ce qui n'en faisait pas une priorité à surveiller pour le risque de déclenchement d'avalanches. À l'inverse, la croûte du 24 décembre était adjacente à des couches faibles propices au déclenchement d'avalanches (couches de facettes, en bleu pâle dans la figure-18). De plus, la cohésion entre les grains de cette croûte est moindre que pour les croûtes discutées précédemment, ce qui a également limité l'importance qui lui fut accordée par les opérations. La simulation *SNOWPACK* est en accord avec ces caractéristiques, montrant une taille de lien entre les grains plus faible pour la croûte du 19 janvier 2015 comparativement aux deux croûtes majeures du 16 et 24 décembre 2014.

## 5. Discussion

### 5.1 Discussion sur les résultats des simulations

Les simulations par le modèle *SNOWPACK* sont en général assez concordantes avec la réalité observée lors des campagnes terrain. Certains aspects de la modélisation sont toutefois biaisés comme la taille des grains de neige. Le modèle tend, pour la majorité des types de grains, à surestimer cette mesure (Langlois *et al.*, 2012; Schweizer *et al.*, 2006). Les simulations ont également montré une sous-estimation de la taille des grains de givre de surface. Ce type de grains est géré à l'intérieur du modèle indépendamment du module qui régit la taille des autres types de grains (Lehning, 2002). Certaines études s'attardent d'ailleurs à cet aspect afin d'analyser les sources de biais relié à ce type spécifique de grain (Horton, 2014). De plus, pour des sites où le climat génère un couvert neigeux mince et où les températures sont froides, le modèle tend à ne pas intégrer adéquatement le métamorphisme lié au gradient de température. Ce problème peut résulter en une modélisation erronée des couches à la base du couvert neigeux qui sont critiques pour la prévention d'avalanches dans ce contexte climatique. Le métamorphisme de fusion de la neige causé par les cycles de fonte et de gel est quant à lui généralement bien intégré dans le modèle, comme en fait foi la simulation relativement précise des différentes croûtes majeures dans le couvert neigeux des sites d'études des monts Chic-Chocs pour l'hiver 2014-2015.

Il est difficile de déterminer lequel des modèles météorologiques utilisés dans le projet a le mieux performé dans les simulations. D'une manière générale, chacun des modèles a eu des passages où il performait très bien et d'autres où l'écart entre les données simulées et observées était plus significatif. La plus grande tâche afin d'obtenir des simulations précises tout au long de l'hiver serait de constamment filtrer les données météorologiques de réanalyses afin d'éviter de traîner tout au long de la saison une modélisation erronée d'une des variables utilisées en intrant comme cela a pu être remarqué lors de l'analyse des HN aux différents sites d'étude.

### 5.2 Recommandations

Dans la poursuite du programme de recherche, une recommandation serait d'instaurer un processus de collecte de données terrain plus systématique et plus fréquent. La quantité de profils de neige réalisés et l'intervalle de temps couvrant ces données sont faibles et limitent les conclusions que l'on peut tirer sur l'efficacité du modèle à simuler le couvert neigeux durant

toute une saison. Avoir des données de puits de neige avec un intervalle temporel constant (par exemple, toutes les deux semaines) améliorerait grandement notre efficacité à juger la performance du modèle. Une seconde recommandation serait de réduire le nombre de sites d'études à deux ou même à un seul site afin de pouvoir étudier plus en détail certains aspects des simulations. Les coûts logistiques pour étudier trois sites d'études dans un même projet sont importants et limitent la durée et l'occurrence de chacune des campagnes terrains. Le projet a permis de voir que peu importe le type de climat montagneux pour lequel le modèle *SNOWPACK* simule le couvert neigeux, ce dernier est relativement efficace et permet d'avoir une information assez fiable sur la structure du manteau neigeux. Cette conclusion permettrait alors de centrer les efforts d'analyses et de validation des sorties du modèle à un seul site et climat montagneux. En centrant le processus d'analyse, des aspects comme la variabilité selon le versant, la position dans la pente et l'exposition au vent pourraient être plus explorés.

La démarche initiale a également été modifiée. Des simulations avec le modèle *Alpine3D*, un modèle dérivé de *SNOWPACK*, devaient être incluses dans la méthodologie du projet. Toutefois, des complications au niveau de l'utilisation et support de ce modèle ont fait en sorte qu'elles n'ont jamais pu être réalisées et les efforts ont ainsi été centralisés sur d'autres aspects du projet. Malgré tout, les connaissances sur celui-ci étant nettement plus grandes qu'au début du projet, il serait très intéressant de pouvoir éventuellement inclure ce modèle dans les analyses futures.

Finalement, il serait intéressant d'approfondir la relation entre les événements de pluie sur neige et leur relation avec le déclenchement d'avalanches. Dans un contexte de réchauffement climatique, ces événements sont de plus en plus fréquents et pose un risque important pour la sécurité des amateurs de plein-air en montagne. La détection de ces événements à l'aide des outils de télédétection et le couplage de ces produits avec un modèle comme *SNOWPACK* pourrait permettre une meilleure et plus complète évaluation des risques associés aux déplacements en arrière-pays.

## 6. Conclusion

Le projet a permis d'avoir un aperçu du potentiel de l'utilisation des simulations *SNOWPACK* afin d'évaluer à distance la stabilité du couvert neigeux dans trois contextes climatiques différents au Canada. L'exercice de validation des données météorologiques de réanalyses a permis de constater que les données GEM-LAM étaient généralement les plus précises, ce qui était normalement attendu vu la meilleure résolution de celles-ci (tableaux 10 et 11). Les données GEM-LAM ont également montré des résultats prometteurs parmi les données météorologiques de réanalyses lors de l'évaluation des sorties de densité et de profil de température. Toutefois, les caractéristiques physiques des sites d'études et la qualité des données météorologiques de stations de mesures automatiques influencent grandement les valeurs de précision obtenues. L'évaluation de la structure générale du couvert neigeux simulé par *SNOWPACK* (données in-situ) à l'aide des données d'*InfoEX* a permis de comparer avec des données provenant d'un contexte opérationnel la performance du modèle à simuler adéquatement des couches faibles persistantes. Toutefois, un biais est notable au niveau des simulations de la taille des grains de neige, particulièrement pour ce qui est du givre de surface. Ce biais peut induire une erreur dans l'évaluation générale de la stabilité du couvert puisqu'il est directement relié à la cohésion entre les grains de neige et conséquemment entre les couches formant la structure du couvert neigeux. Ce biais a d'ailleurs été mentionné dans quelques études (Langlois *et al.*, 2012; 2009) et est actuellement à l'étude afin d'améliorer cet aspect du modèle.

Afin de réaliser l'objectif général du projet qui était d'évaluer le potentiel de simulations numériques régionales du couvert neigeux par le modèle *SNOWPACK* en validant certaines sorties avec des données provenant de campagnes terrain, trois objectifs secondaires ont été définis. La comparaison entre les données météorologiques GEM-LAM, GEM10 et GEM15 et les données de stations météorologiques automatique a permis de déterminer que, de manière générale, les données GEM-LAM offraient les meilleures simulations de neige parmi celles-ci. Les deux autres objectifs ont été réalisés de manière conjointe, soit en validant certaines sorties importantes du modèle (profil de température, profil de densité et stratigraphie) avec les données acquises lors des campagnes terrain. Le calcul des valeurs de densités relatives moyennes, de températures relatives moyennes et l'analyse stratigraphique du couvert neigeux durant une

saison complète avec l'aide des données *InfoEX* ont permis d'obtenir une idée de la précision du modèle à chaque site d'étude.

La première hypothèse, soit que les données GEM-LAM seront les plus performantes parmi les données de réanalyses, a ainsi été validée à l'aide de la comparaison avec les données in-situ présentée à la section 3.1. Il est cependant plus difficile d'affirmer avec certitude que la seconde hypothèse, soit que les sorties importantes du modèle pour l'évaluation de la stabilité du couvert neigeux présenteront une précision suffisante afin de pouvoir appuyer les décideurs en prévention d'avalanche, ait été validée. Bien que des résultats encourageants aient été obtenus, notamment pour la validation de la stratigraphie, la méthodologie de validation des sorties *SNOWPACK* doit être revue afin d'obtenir des indices de performance plus précis et mesurables dans un contexte de prévention d'avalanches.

## Références

- AAA (2014). American Avalanche Association Homepage, Victor, États-Unis, <http://www.americanavalancheassociation.org/index.php>.
- Anderson, E. A. (1976). A point energy and mass balance model of a snow cover, Office of Hydrology – National Weather Service.
- Armstrong, R. et Brun, E.: Snow and climate: physical processes, surface energy exchange and modeling, Cambridge University Press, England, 2008, 256p.
- Bartelt, P. et Lehning, M. (2002). A physical *SNOWPACK* model for the Swiss avalanche warning: Part I: numerical model. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 35, no. 3, p.123–145.
- Bavay, M. (2012). Format specification for the SMET Weather Station Meteorological Data Format version 1.1, Davos, Suisse, 5p.
- Bazile, E., El Haiti, M., Bogatchev, A., et Spiridonov, V.: Improvement of the snow parametrisation in ARPEGE/ALADIN. *in* Proceedings of SRNWP/HIRLAM Workshop on surface processes, turbulence and mountain effects, 22–24 October 2001, Madrid, Espagne.
- Bellaire, S. et Jamieson, B. (2013a). On estimating avalanche danger from simulated snow profiles, p.154-161 *in* Conference Proceedings - International Snow Science Workshop 2013, Grenoble, France, p.154-161.
- Bellaire, S., et Jamieson, B. (2013b). Forecasting the formation of critical snow layers using a coupled snow cover and weather model. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 94, p.37–44.
- Bellaire, S., Jamieson, B. et Fierz, C. (2011). Forcing the snow-cover model *SNOWPACK* with forecasted weather data. *The Cryosphere*, vol. 5, no. 4, p.1115–1125.
- Bellaire, S., Schweizer, J., et Fierz, C. (2006). Predicting snow cover stability with the snow cover model *SNOWPACK*. p.38-48 *in* Conference Proceedings – International Snow Science Workshop 2006, Telluride, États-Unis, p.38–43.
- Best, M. J., Pryor, M., Clark, D. B. (2011) The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), Model description – Part1: Energy and water fluxes, *Geoscience Model Development*, vol. 4, p.677–699.
- Boone, A. et Etchevers, P. (2001) An intercomparison of three snow schemes of varying complexity coupled to the same land-surface model: Local scale evaluation at an Alpine site, *Journal of Hydrometeorology*, vol. 2, no.374 – 394.

- Brown, R., Bartlett, P., MacKay, M., et Versegny, D. (2006) Evaluation of snow cover in CLASS for SnowMIP, Atmosphere and Ocean, vol. 44, p. 223– 238.
- Brun, E., David, P., Sudul, M. et Brugnot, G. (1992). A numerical model to simulate snowcover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, vol. 38, p.13–22.
- Brun, B. E., Martin, E., Simon, V., et Gendre, C. (1989). An energy and mass model of snow cover sidtable for operational avalanche forecasting, *Journal of Glaciology*, vol. 35, no.12, p.333–342.
- CAA (2012). Avalanche Operations Level 1 Course Manual. Canadian Avalanche Association, Revelstoke, Canada, 225p.
- CAA (2007). Observation guidelines and recording standards for weather, *SNOWPACK* and avalanches. Canadian Avalanche Association, Revelstoke, Canada, 93p.
- CAA (s.d). Avalanche online course. *in* Canadian Avalanche Centre, Canadian Avalanche Association, Revelstoke, Canada, <http://www.avalanche.ca/cac/training/online-course>.
- Commission de toponymie du Québec (2012). Monts Chic-Chocs. Gouvernement du Québec, Québec, Canada, [http://www.toponymie.gouv.qc.ca/ct/ToposWeb/fiche.aspx?no\\_seq=13165](http://www.toponymie.gouv.qc.ca/ct/ToposWeb/fiche.aspx?no_seq=13165).
- Dolant, C., Langlois, A., Montpetit, B., Brucker, L., Roy, A., and Royer, A. (2015) Empirical development of a rain-on-snow detection algorithm using passive microwave radiometry. Submitted, Hydrological Processes, HYP-15-0494.
- Douville, H., Royer, J. F., et Mahfouf, J. F. (1995) A new snow parameterization for the Meteo-France climate model. Part I: validation in stand-alone experiments, *Climate Dynamics*, vol. 12, p.21–35
- Durand, Y., Giraud, G., Brun, E., Mérindol, L., et Martin, E. (1999). A computer-based system simulating *SNOWPACK* structures as a tool for regional avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, vol. 45, no. 151, p.469–484.
- Etchevers, P., Martin, E., Brown, R., Fierz, C. et Lejeune, Y. (2002). SnowMiP, an intercomparison of snow models: first results. p.353-360 *in* Proceedings of the International Snow Science Workshop, Penticton, Canada, 29 Sep.-4 Oct., 2002, p.353-360.
- Fortin, G. et Hétu, B. (2009). Les extrêmes météorologiques hivernaux et leurs influences sur la couverture neigeuse dans les monts Chic-Chocs, Gaspésie, Canada. *Geographia Technica*, numéro spécial, 181-186.



- Gagnon, R.M. (1970). Climat des Chic-Chocs. Ministère des Richesses Naturelles, Service de la Météorologie, Gouvernement du Québec, No. 36.
- Germain, D., et Voiculescu, M. (2007). Les avalanches de neige dans les Chic-Chocs (Canada) et les Carpates Méridionales (Roumanie), Bilan des connaissances et perspectives futures, vol. 9, p.17–31.
- Gouvernement du Canada (2014a). Données numériques 10 km de résolution du Système régional de prévision déterministe (SRPD) – Format GRIB2 *in* Météo. Gouvernement du Canada, Ottawa, Canada, [http://meteo.gc.ca/grib/grib2\\_reg\\_10km\\_f.html](http://meteo.gc.ca/grib/grib2_reg_10km_f.html).
- Gouvernement du Canada (2014b). Données numériques 15 km de résolution du Système régional de prévision déterministe (SRPD) – Format GRIB2 *in* Météo. Gouvernement du Canada, Ottawa, Canada, [http://meteo.gc.ca/grib/grib2\\_reg\\_15km\\_f.html](http://meteo.gc.ca/grib/grib2_reg_15km_f.html).
- Gouvernement du Canada (2014c). Données numériques – Système à haute résolution de prévision déterministe (SHRPD) – Format GRIB2, Gouvernement du Canada, Ottawa, Canada, [http://meteo.gc.ca/grib/grib2\\_HRDPS\\_HR\\_f.html](http://meteo.gc.ca/grib/grib2_HRDPS_HR_f.html).
- Hägeli, P., et McClung, D. M. (2003). Avalanche characteristics of a transitional snow climate—Columbia Mountains, British Columbia, Canada. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 37, no. 3, p.255–276.
- Horton, S., Bellaire, S., Jamieson, B. (2014) Modelling the formation of surface hoar layers and tracking post-burial changes for avalanche forecasting. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 97, p. 81-89.
- Jamieson, B., et Johnston, C. D. (1992). *SNOWPACK* characteristics associated with avalanche accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 29, no. 5, p.862–866.
- Jordan, R. (1991). A one-dimensional temperature model for a snowcover. *Cold Regions Research and Engineering Laboratory Special Report*, 91–16.
- LaChapelle, E. (1966). Avalanche Forecasting--a Modern Synthesis. *IAHS*, vol. 69, p.350–356.
- Langlois, A. Royer, A. Derksen, C. Montpetit, B., Dupont, F., Goita, K. (2012) Coupling the snow thermodynamic model *SNOWPACK* with the microwave emission model of layered *snowpacks* for subarctic snow water equivalent retrievals. *Water Resources Research*, vol. 48, no. 12, no. art. W12524.
- Langlois, A., Brucker, L., Kohn, J., Royer, A., Derksen, C., Cliché, P., Picard, G., Willemet, J.M., Fily, M. (2009) Simulation of snow water equivalent (SWE) using thermodynamic snow models in Québec, Canada. *Journal of Hydrometeorology*, vol. 10, no. 6, p. 1447-1463.

- Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., et Fierz, C. (2002a). A physical *SNOWPACK* model for the Swiss avalanche warning: Part III: Meteorological forcing, thin layer formation and evaluation. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 35, p.169–184.
- Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Fierz, C., & Satyawali, P. (2002b). A physical *SNOWPACK* model for the Swiss avalanche warning Part II. Snow microstructure. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 35, no.3, p.147–167.
- Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Russi, et Zimmerli, M. (1999). *SNOWPACK* model calculations for avalanche warning based upon a new network of weather and snow stations. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 30, p.145–157.
- Lehning, M., Voelksch, I., Gustafsson, D., Nguyen, T. A., Stähli, M., et Zappa, M. (2006). ALPINE3D: a detailed model of mountain surface processes and its application to snow hydrology. *Hydrological Processes*, vol. 20, no.10, p.2111–2128.
- Marmot Basin Ski Resort (2014). Mountain Stats. *in* Marmot Basin Ski Resort Homepage, Marmot Basin Ski Resort, Jasper, Canada, <http://www.skimarmot.com/mountain/general-information/mountain-stats>.
- McClung, D. M., et Schaerer, P. A. (1993). *The Avalanche Handbook*. The Mountaineers, Seattle, 271p.
- McClung, D. et Schaerer, P. (2006). *The avalanche handbook*. The Mountaineers books, Seattle, États-Unis, 344p.
- McElwaine, J., Hachikubo, A., Nemoto, M., Kaihara, T., Yamada, T. et Nishimura, K. (2000). Observations and simulations of the formation of the faceted snow crystals in the weak-layer of the 1998 Niseko Haru no Taki avalanche. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 31 no. 3.
- Mock, C., et Birkeland, K. (2000). Snow avalanche climatology of the western United States mountain ranges. *Bulletin of the America Meteorological Society*, vol. 81, no. 10, p.2367-2390.
- Montpetit, B., Royer, A., Roy, A., Langlois, A., et Derksen, C. (2013). Snow Microwave Emission Modeling of Ice Lenses Within a Snowpack Using the Microwave Emission Model for Layered Snowpacks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, no. 9, p.4705–4717.
- Monin, A. S., Obukhov, A. M. (1954) Basic Laws of Turbulent Mixing in the Ground Layer of the Atmosphere. *Trans. Geophys. Inst. Akad. Nauk. USSR*, vol. 151, p.163–187
- Monti, F., Cagnati, A., Valt, M., et Schweizer, J. (2012). A new metehod for visualizing snow stability profiles. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 78, p.64-72.

- Nishimura, K., Baba, E., Hirashima, H., et Lehning, M. (2005). Application of the snow cover model *SNOWPACK* to snow avalanche warning in Niseko, Japan. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 43, p.62–70.
- Oleson, K.W., D.M. Lawrence, G.B. Bonan, B. Drewniak, M. Huang, C.D. Koven, S. Levis, F. Li. (2010). Technical Description of version 4.5 of the Community Land Model (CLM). NCAR Technical Note NCAR/TN-503.
- Parcs Canada (2009a). Climat et géologie – Parc national de Jasper *in* Parcs nationaux du Canada. Parcs Canada, Jasper, Canada, <http://www.pc.gc.ca/fra/pn-np/ab/jasper/natcul/geo-climat.aspx>.
- Parcs Canada (2009b). Météo et climat – Parc national des Glaciers *in* Parcs nationaux du Canada. Parcs Canada, Revelstoke, Canada, <http://www.pc.gc.ca/fra/pn-np/bc/glacier/visit/visit4.aspx>.
- Roch, A., 1949. Report on snow avalanche conditions in the U.S.A. western ski resorts from the 26th of January to the 24th of April, 1949. Internal Report 174, Eidg. Institut für Schnee und Law inenforchung, Davos, Suisse.
- Shirmer, M. et Jamieson, B. (2015). Verification of analysed and forecasted winter precipitation in complex terrain. *The Cryosphere*, no.9, p.587-601
- Schirmer, M., Schweizer, J., et Lehning, M. (2010). Statistical evaluation of local to regional snowpack stability using simulated snow-cover data. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 64, no. 2, p.110–118.
- Schweizer, J. et Reuter, B. (2015) A new index combining weak layer and slab properties for snow instability prediction. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, no.15, p.109-118.
- Schweizer, J., Bellaire, S., Fierz, C., Lehning, M., et Pielmeier, C. (2006). Evaluating and improving the stability predictions of the snow cover model *SNOWPACK*. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 46, no. 1, p.52–59.
- SÉPAQ (2014). Portrait *in* Réserve faunique des Chic-Chocs, Gouvernement du Québec, Québec, Canada, <http://www.sepaq.com/rf/chc/portrait.dot>.
- Shrestha, M., Wang, L., Koike, T., Xue, Y., and Hirabayashi, Y. (2010) Improving the snow physics of WEB-DHM and its point evaluation at the SnowMIP sites, *Hydrological Earth Systems Science*, vol. 14, p.2577–2594.
- SLF (2014). WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, WSL-SLF, Davos, Suisse, [http://www.slf.ch/index\\_EN](http://www.slf.ch/index_EN).

- Stethem, C., Jamieson, B., & Schaerer, P. (2003). Snow avalanche hazard in Canada—a review. *Natural Hazards*, vol. 28, p.487–515.
- Vionnet, V., Brun, E., Morin, S., Boone, a., Faroux, S., Le Moigne, P. et Willemet, J.-M. (2012). The detailed snowpack scheme Crocus and its implementation in SURFEX v7.2. *Geoscientific Model Development*, vol. 5, no. 3, p.773–791.

## Annexe

### Annexe 1 – Carte du site d'étude du Mont Fidelity, Parc National des Glaciers, Colombie-Britannique.

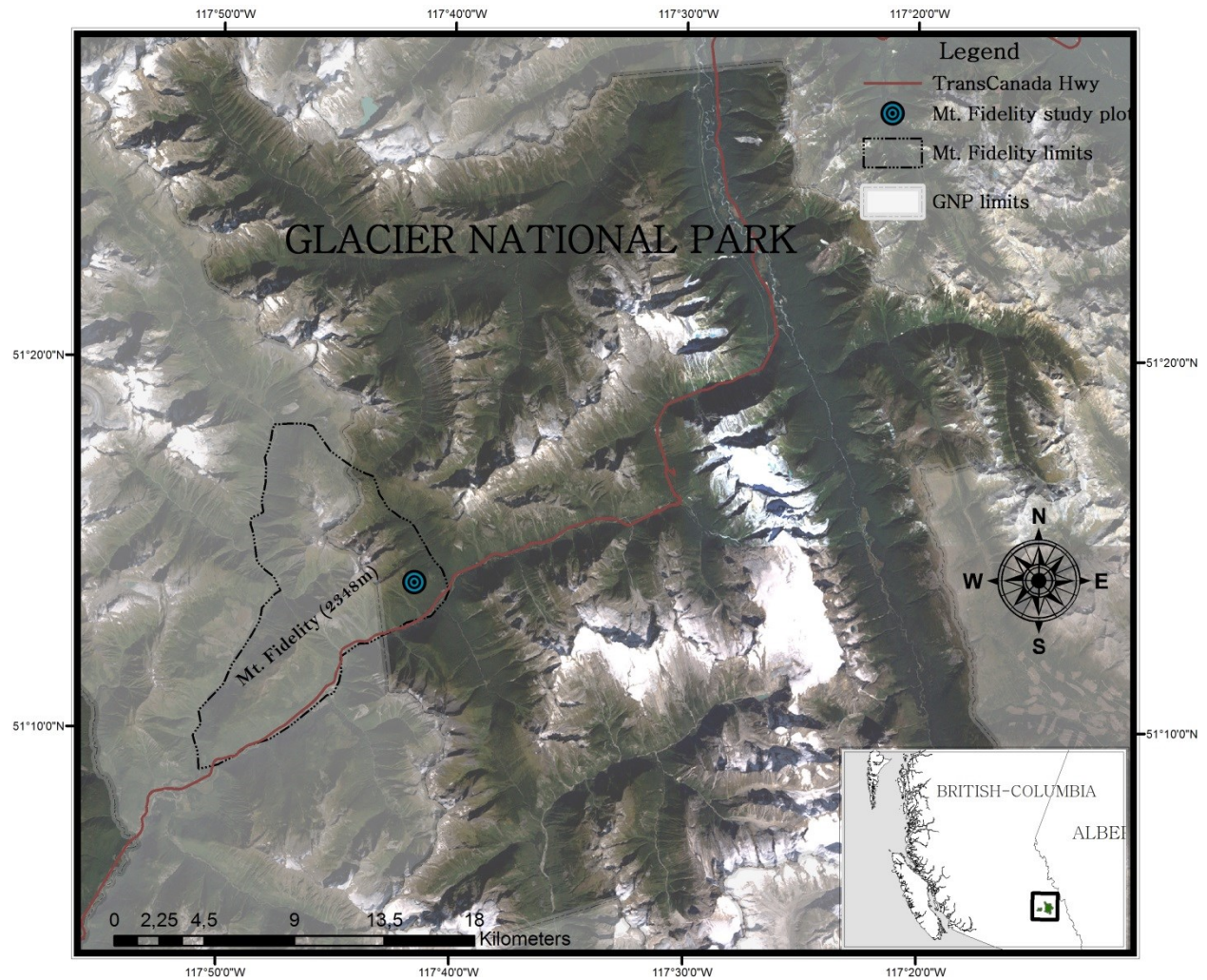
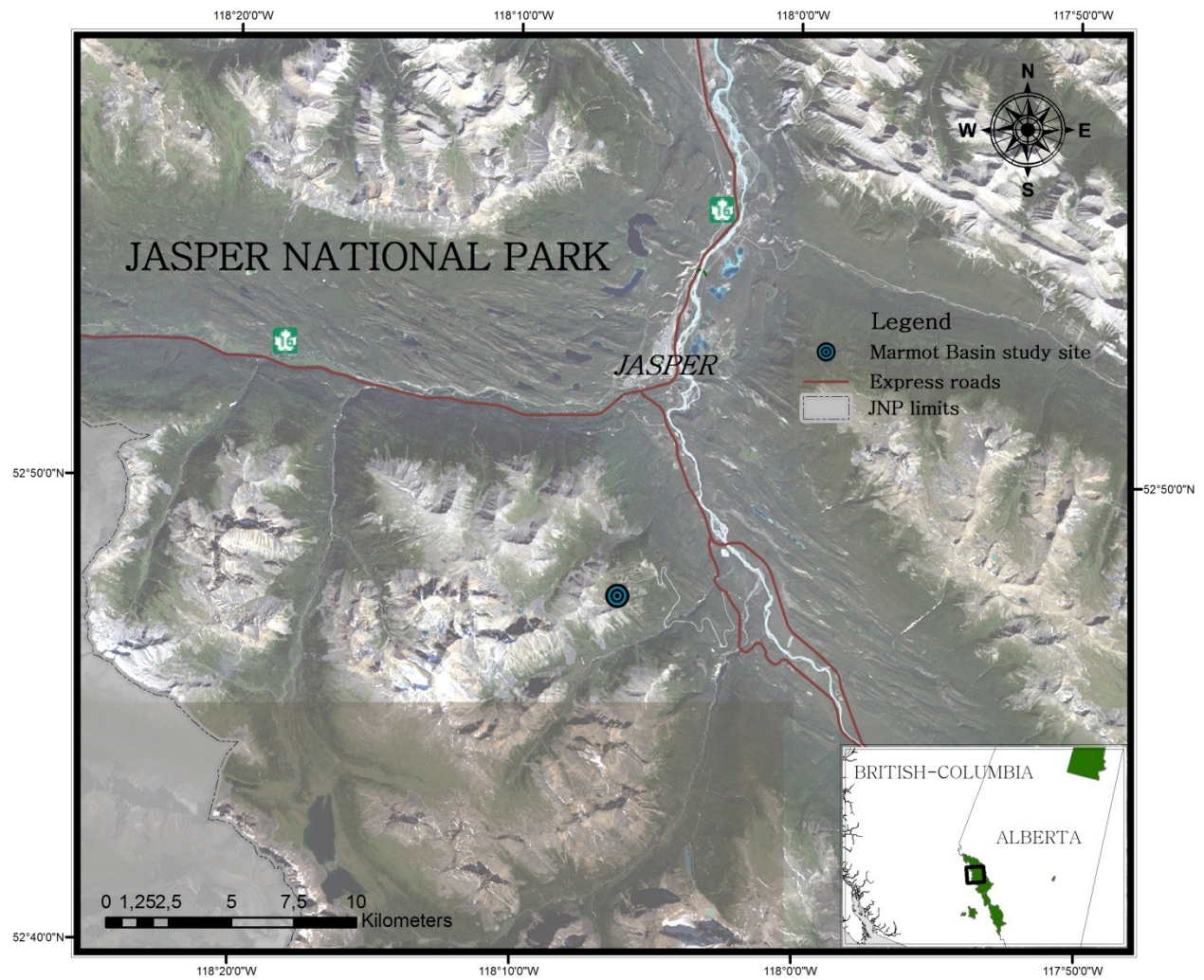


Figure 19. Carte du site d'étude du Mont Fidelity, Parc National des Glaciers, Colombie-Britannique (source des données géographiques : Géogratis.ca).

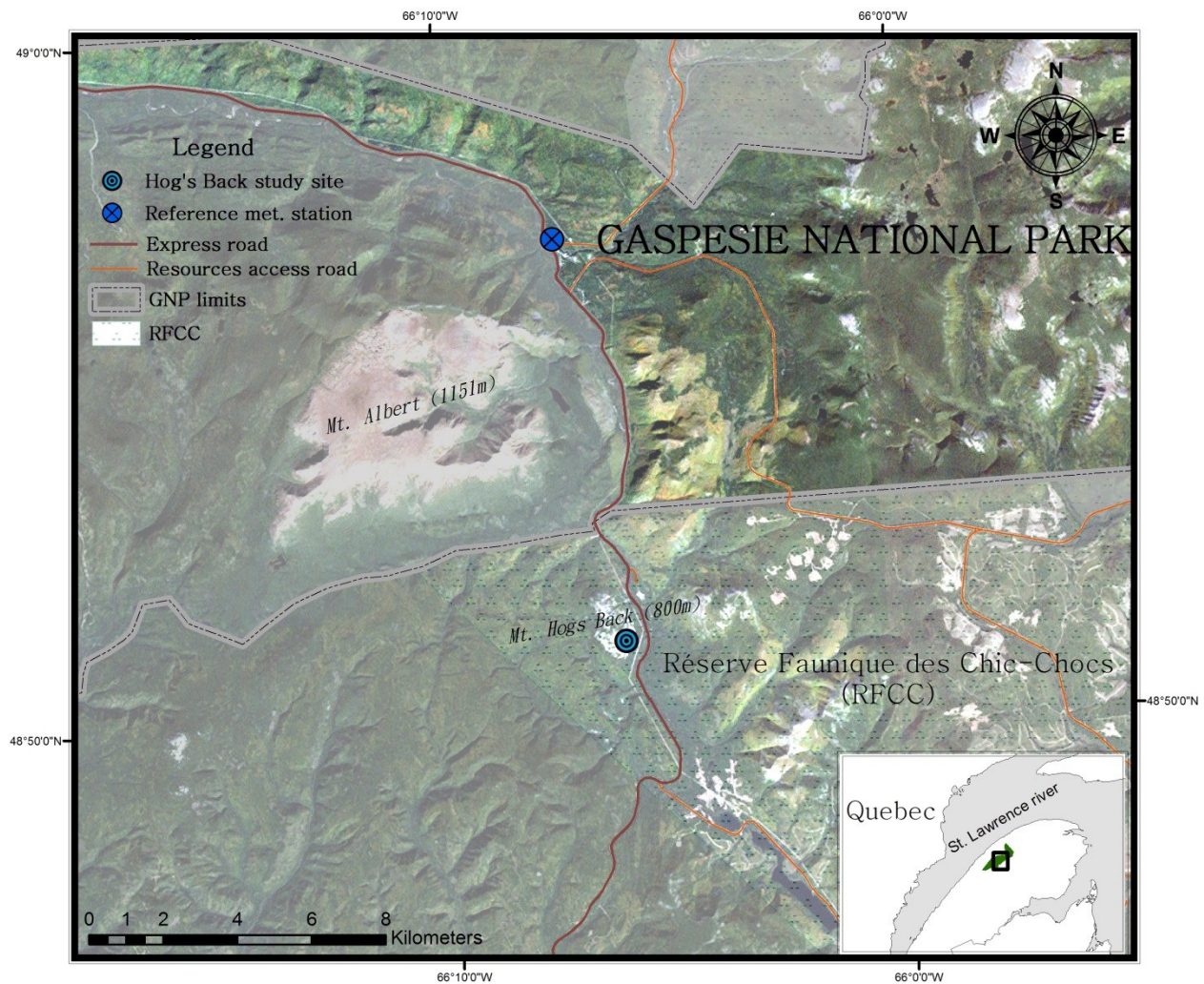


**Annexe 2 – Carte du site d'étude de Marmot Basin, Parc National de Jasper, Alberta.**



**Figure 20. Carte du site d'étude de Marmot Basin, Parc National de Jasper, Alberta (source des données géographiques : Géogratis.ca).**

**Annexe 3 – Carte du site d'étude des Monts Chic-Chocs, Parc National de la Gaspésie, Québec.**



**Figure 21. Carte du site d'étude des Monts Chic-Chocs, Parc National de la Gaspésie, Québec (source des données géographiques : Géogratis.ca).**

#### **Annexe 4 – Article scientifique soumis à la revue *Physical Geography***

Côté, K., Madore, J.-B., and Langlois, A. 2015. A Canadian context on uncertainties in the thermodynamic multilayer snow model *SNOWPACK* - PART I: sensitivity to uncertainties in climatic forcing data. Submitted, *Physical Geography*, TPHY-S-16-00007.



## Physical Geography

### Uncertainties in the SNOWPACK multilayer snow model for a Canadian avalanche context: sensitivity to climatic forcing data --Manuscript Draft--

<b>Full Title:</b>	Uncertainties in the SNOWPACK multilayer snow model for a Canadian avalanche context: sensitivity to climatic forcing data
<b>Manuscript Number:</b>	
<b>Article Type:</b>	Regular Article
<b>Keywords:</b>	Avalanches; Snowpack, Snow, Simulation, Gem, Modelling
<b>Manuscript Classifications:</b>	Climate processes; Human-environment interaction
<b>Abstract:</b>	<p>As interest in outdoor activities in remote areas is increasing, there is a strong need for improved avalanche forecasting at the regional scale. Due to important logistical and safety matters, avalanche terrain measurements are not always possible for practitioners/forecasters (avalanche observations, snowpack profiles and stability tests). An interesting alternative would be to analyze the snowpack without these challenges by using snow model outputs. The SNOWPACK model is currently used operationally for avalanche prediction and research in the Swiss Alps. Thus, this paper presents a summary of analyses that have been conducted to assess the potential of using the SNOWPACK model driven with both in-situ and forecasted meteorological data in a Canadian context. A comparison of meteorological data from in-situ and predicted datasets for two winters shows that the GEMLAM weather model is the most accurate for the three climatic contexts of this project, but also showed a precipitation bias proportional to its intensity/rate. Snow simulations forced with GEMLAM are the closest to field measurements. Finally, predictions of persistent weak layers have been validated using the InfoEx platform from Avalanche Canada. Crust and surface hoar formation dates agree with the information reported in InfoEx.</p>

1     **Uncertainties in the SNOWPACK multilayer snow model for a Canadian**  
2                   **avalanche context: sensitivity to climatic forcing data**

3

4

5

6     Côté, K.<sup>1,2</sup>, Madore, J.-B.<sup>1,2</sup> and Langlois, A.<sup>1,2</sup>

7

8

9     <sup>1</sup>Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, Québec, Canada

10    <sup>2</sup>Centre d'Études Nordiques, Université Laval, Québec, Canada

11

12

13    Prepared for publication in **Journal of Physical Geography**

14

15

16

17

18

19

20

21    \* Corresponding author:

22     Kevin Côté

23     Centre d'Applications et de Recherches en Télédétection (CARTEL)

24     Département de Géomatique Appliquée

25     Université de Sherbrooke

26     Sherbrooke, Québec, J1K 2R1

27     Tel : 819-821-8000 #62506

28     Fax: 819-821-7944

29     [kevin.cote2@USherbrooke.ca](mailto:kevin.cote2@USherbrooke.ca)

30

31    **Abstract**

32    As interest in outdoor activities in remote areas is increasing, there is a strong need for improved avalanche  
33    forecasting at the regional scale. Due to important logistical and safety matters, avalanche terrain measurements  
34    are not always possible for practitioners/forecasters (avalanche observations, snowpack profiles and stability  
35    tests). An interesting alternative would be to analyze the snowpack without these challenges by using snow  
36    model outputs. The SNOWPACK model is currently used operationally for avalanche prediction and research in  
37    the Swiss Alps. Thus, this paper presents a summary of analyses that have been conducted to assess the potential  
38    of using the SNOWPACK model driven with both in-situ and forecasted meteorological data in a Canadian  
39    context. A comparison of meteorological data from in-situ and predicted datasets for two winters shows that the  
40    GEMLAM weather model is the most accurate for the three climatic contexts of this project, but also showed a  
41    precipitation bias proportional to its intensity/rate. Snow simulations forced with GEMLAM are the closest to  
42    field measurements. Finally, predictions of persistent weak layers have been validated using the *InfoEx* platform  
43    from Avalanche Canada. Crust and surface hoar formation dates agree with the information reported in *InfoEx*.

44

45    **Keywords:** avalanches, snowpack, snow, simulation, gem, modelling

46

## 47   **1.0. Introduction**

48   Each year, approximately 1.5 million potentially dangerous avalanches occur in Canada, of  
49   which 5% are in areas accessible to mountain users. Since the 1990s, an average of 12  
50   victims per year is recorded, making avalanches the deadliest natural geohazard in Canada  
51   (Stethem, 2003). The large-scale analysis of snow conditions, from an avalanche prevention  
52   perspective, is now considered a priority (Schweizer, 2008; Stethem, 2003; Jamieson et al.,  
53   2002; Jamieson et al, 1992). As of now, avalanche risk prediction remains spatially limited to  
54   discrete observations, which consists of snowpit measurements of stratigraphy and  
55   compression tests (CAA, 2007). However, the spatial variability of avalanche terrain  
56   (elevation, aspect and land cover) induces that the measurement approach is only precise at  
57   the local scale. The risk in conducting the measurements, the sparse nature of meteorological  
58   information from stations and the time to access the various sites seriously limits the  
59   evaluation of snow stability at the regional scale (Schirmer et al, 2010). Isolated areas are  
60   now increasing in popularity, thus the lack of spatially distributed information increases the  
61   risk for mountain users.

62

63   It was previously shown that coupling meteorological data from stations with snow  
64   thermodynamic models can be an alternative for the evaluation of snow conditions and  
65   stability at a larger scale (Bellaire, 2006). Models such as SNOWPACK (Bartelt and  
66   Lehning, 2002; Lehning *et al.*, 2002a, 2002b) and CROCUS (Brun *et al.*, 1989) are widely  
67   used in an avalanche prediction context, mostly in Europe and not yet adapted to North  
68   America. CROCUS was the first numerical model to simulate snow metamorphism and  
69   stratigraphy allowing near real-time analysis of snow geophysical properties (Durand et al.,  
70   2009). SNOWPACK simulates snow conditions and characterizes the force and resistance of  
71   each layer following their internal geophysical properties (Schweizer *et al.*, 2006).

72 SNOWPACK has been use operationally since 1997-1998 in Switzerland, forced with a  
73 dense meteorological station network (Lehning, 1999).

74

75 The use of such models by avalanche experts has recently increased because of the  
76 limitations of punctual observations; however, in-situ observations remain essential for  
77 validation purposes (Langlois et al., 2012). Furthermore, the lack of accuracy of snow  
78 simulations can be attributed to uncertainties in the meteorological forcing data, especially  
79 when using climate models that are now considered as an alternative (Langlois et al, 2009;  
80 2012; Ouellet et al., 2015) to the sparse meteorological station networks in Canada. Although  
81 an interesting avenue, the coupling of SNOWPACK with such models can increase  
82 uncertainties in the simulations and the sensitivity to specific meteorological variables  
83 remains unknown. Hence, the general objective of this paper is to couple the SNOWPACK  
84 model with the three versions of the Global Environmental Multiscale Model (GEM10,  
85 GEM15 and GEM-LAM) for Canadian avalanche terrain. Specifically, we intend to 1)  
86 validate the three versions of GEM in eastern and western Canada avalanche terrain using in-  
87 situ meteorological stations, 2) conduct snow simulations using the three forcing datasets, and  
88 3) validate the snow simulations from the three GEM versions using field campaign  
89 measurements.

90

## 91 **2.0. Data and methods**

### 92 ***2.1. Study sites***

#### 93 ***2.1.1. Réserve Faunique des Chic-Chocs, Québec, Canada (RFCC)***

94 The Réserve Faunique des Chic-Chocs (hereinafter referred as RFCC) is located on the  
95 Gaspésie peninsula, eastern Québec, Canada (Figure-1). The RFCC is the host of the Centre  
96 Avalanche Québec that was created in 1999 following the Kangiqsuallujuaq avalanche in

197 Nunavik, northern Québec. The centre provides snow bulletins for several areas of the RFCC  
198 including Mont Albert, Mont Hog's Back, Champs-de-Mars, Mont Lyall, Monts Vallières-  
199 de-Saint-Réal, Mont Blanche-Lamontagne and Mines Madeleine.

200 [ insert figure-1 here ]

201 Figure-1. Reserve Faunique des Chic-Chocs – RFCC (QC) study site map.

202 The RFCC site is interesting for our research for the following reasons:

- 203 - Easier to access;
- 204 - Long record of historical meteorological data;
- 205 - Presence of meteorological towers to drive SNOWPACK

206

207 Avalanche bulletins are produced regularly; however, SNOWPACK has never been used nor  
208 validated in this region. The Chic-Chocs area covers approximately 95 x 20 km (Commission  
209 de toponymie du Québec, 2012) and is considered the snowiest place in Québec (SEPAQ,  
210 2014). The influence of thermal inversions is significant, and the snow loading effect  
211 combined with considerable wind typically leads to wind slab problems (Desaulniers, 2015).

212

#### 213 2.1.2. Jasper National Park, Alberta, Canada

214 The Jasper National Park (hereinafter refereed to as JNP) is one of the oldest parks in Canada  
215 established in 1907 and is located in western Alberta (Figure-2). The JNP has avalanche  
216 bulletins produced through the Canadian Avalanche Centre and Parks Canada. Particularly,  
217 avalanche terrain maps are produced for the Bald Hills and Whistler Creek regions. It should  
218 be noted that SNOWPACK has never been used in this region and fieldwork was focused on  
219 the Marmot Basin region, which includes the highest elevation base for a ski resort in Canada  
220 (1697 m). The site is readily accessible by mountain users, with a continental climate  
221 characterized by 400 cm in precipitation on average (Marmot Basin Ski Resort, 2014).

122 Conditions are typically cold and windy (Parks Canada, 2009a) leading to the frequent  
123 formation of wind slabs with a kinetic metamorphism dominant environment.

124 [ insert figure-2 here ]

125 Figure-2. Jasper National Park (AB) study site map.

126 2.1.3. *Glacier National Park, British Columbia, Canada (GNP)*

127 The Glacier National Park (hereinafter referred in as GNP) is located in the interior belt of  
128 British Columbia (Figure-3). GNP also produces avalanche bulletins through Parks Canada  
129 and the Canadian Avalanche Centre for the Asulkan and Illecillewaet, Connaught Creek,  
130 Loop Brook, NRC Gully and Hermit Meadows regions. However, our efforts focused on the  
131 Roger's Pass National Historic Site area for the following reasons:

- 132 - Ongoing snow research
- 133 - Easier to access;
- 134 - Long record of historical data;
- 135 - Heavily instrumented;

136

137 [ insert figure-3 here ]

138 Figure-3. Glacier National Park (BC) study site map.

139 Specifically, Mount Fidelity has a transitional climate, which is warmer than JNP and RFCC,  
140 with significant precipitation year-round. Warm air masses from the Pacific Ocean combined  
141 with the orographic effect of the Columbia mountain range (Parks Canada, 2009b) can lead to  
142 17 m in precipitation within a single winter. It is considered the snowiest place in Canada,  
143 where an average of 2-3 m snow depth is recorded from mid-October to mid-June. Avalanche  
144 problems in this area are thus related to warm temperatures and snow loading (storm slabs).

145

146  
147  
148  
149  
150  
151  
152  
153  
154  
155  
156  
157  
158  
159  
160  
161  
162  
163  
164  
165  
166  
167  
168  
169  
170  
171

147  
148  
149  
150  
151  
152  
153  
154  
155  
156  
157  
158  
159  
160  
161  
162  
163  
164  
165  
166  
167  
168  
169  
170  
171

148  
149  
150  
151  
152  
153  
154  
155  
156  
157  
158  
159  
160  
161  
162  
163  
164  
165  
166  
167  
168  
169  
170  
171

152  
153  
154  
155  
156  
157  
158  
159  
160  
161  
162  
163  
164  
165  
166  
167  
168  
169  
170  
171

153  
154  
155  
156  
157  
158  
159  
160  
161  
162  
163  
164  
165  
166  
167  
168  
169  
170  
171

155  
156  
157  
  
158  
  
159  
  
160  
  
161  
  
162  
  
163  
  
164  
  
165  
  
166  
  
167  
  
168  
  
169  
  
170  
  
171

157  
158  
159  
160  
161  
162  
163  
164  
165  
166  
167  
168  
169  
170  
171

158  
159  
160  
161  
162  
163  
164  
165  
166  
167  
168  
169  
170  
171

170

171



172 Area Model (GEM-LAM) is available for certain areas of North America (Maritimes,  
173 southwest region of Québec, southeast region of Ontario, western Canada and western Arctic.  
174 The model is run with the High Resolution Deterministic Prediction System (HRDPS) and  
175 provides data at 2.5 x 2.5 km spatial resolution, twice daily. GEM-LAM was developed for  
176 local representativeness, which is quite relevant in an avalanche risk prediction context.

177

### 178 ***2.3. Snow multilayer thermodynamic model: SNOWPACK***

179 The SNOWPACK input data are provided by GEM and the in-situ meteorological station  
180 from the Université de Sherbrooke (UdeS). SNOWPACK solves the partial differential  
181 equations governing snow mass and energy fluxes using a Lagrangian finite element  
182 implementation (Bartlet and Lehning 2002; Lehning et al. 2002). Thermophysical processes  
183 of interest in SWE studies such as phase change; water vapour transport (i.e., metamorphism)  
184 and loss (runoff, evaporation and sublimation) are included. The details on the internal  
185 models will not be given here as further details can be found elsewhere (Lehning et al. 2002;  
186 Bartlet and Lehning 2002). The model is driven using a combination of a SMET  
187 meteorological data input file with a SNO soil input file. SNOWPACK then simulates the  
188 snow cover with a 1-h or 3-h timestep and produces scalar and matrix data for further  
189 analyses.

190

### 191 ***2.4. Snow measurements***

192 Snow pits were excavated daily at the study plots during the field campaigns, while outside of  
193 those periods automated snow depth measurements were recorded at the Mount Fidelity  
194 station. This allowed the investigation of the relationship between the evolution of the snow  
195 overburden and the rates of grain metamorphism and snow stability. Temperature profiles  
196 were recorded using temperature probes with an accuracy of +/- 0.025 °C over a temperature  
197 range of -200 °C to +100 °C. Snow samples were extracted in each identified layer from the

198 surface to the snow/ground interface with a 250 cm<sup>3</sup> density cutter. Each sample was bagged  
199 and weighed using a Pesola light series 100 g dynamometer to obtain density.

200

201 In 2013-2014, field measurements were taken at:

202 RFCC: February 2014, 10 days

203 GNP: March 2014, 5 days

204 JNP: March 2014, 5 days

205

206 In 2014-2015, field measurements were taken at:

207 RFCC: January 2015, 8 days; and February 2015, 10 days

208 GNP: December 2014, 14 days

209

## 210 **3.0. Results and discussion**

### 211 ***3.1. Validation of meteorological forcing data***

212 Each of the meteorological variables used in the SNOWPACK simulations was compared to  
213 the associated data from automatic weather stations at each of the study sites. This  
214 comparison was intended to validate the accuracy of GEM weather models and allowed a  
215 possible adjustment of these variables to assess the sensitivity of the SNOWPACK model.  
216 All variables were compared at each time step (1 h). Wind direction was not included in this  
217 analysis due to the considerable variability in the hourly measurements taken by the  
218 automatic weather stations.

219

220 Table-3 and Table-4 show the comparison between the reference weather data (e.g.,  
221 meteorological stations) and reanalysis data for each of the two winters for the Mount  
222 Fidelity study site. Solar radiation data from the GEM-LAM model are no longer being

223 archived by the CMC since the fall of 2014; therefore, the validation could not be performed  
224 on the two solar radiation variables for the 2014-2015 winter.

225 [insert Table-3 here]  
226 [insert Table-4 here]

227 For most weather variables, GEM-LAM showed the best performance among the three  
228 meteorological models for the winter of 2013-2014. The GEM-LAM model has the best slope  
229 coefficients for all weather variables except for air temperature for which GEM10 and  
230 GEM15 models are more successful, although the 0.92 slope coefficient and RMSE of 1.80  
231 for GEM-LAM show how well this variable is simulated by the model. This could be due to a  
232 more sensitive modeling of local effects in the GEM-LAM grid cell area. Solar radiation  
233 variables (ISWR and ILWR) have lower slope coefficients that can be explained by the  
234 geographical location of the reference weather station for this study site. This variable is  
235 modeled from weather patterns so that solar radiation is constant at a target from sunrise to  
236 sunset. In fact, incident solar radiation in mountainous locations is variable following the  
237 effect of the adjacent mountain slopes on the reference site, which can limit the exposure of  
238 the sensors (local incidence angle). This effect is significant at the Mount Fidelity study site  
239 given that the reference weather station is not at the top of the mountain and is on the  
240 southeast side. However, the performance of the GEM-LAM model is less accurate for the  
241 2014-2015 winter, where GEM10 and GEM15 statistical results suggest better correlations.  
242 However, the general trend for the three meteorological models suggests a lower accuracy of  
243 all the variables of these models for the 2014-2015 winter compared to the 2013-2014 winter.

244

245 Figure-4 presents a bias assessment (modeled data - observed data) for each meteorological  
246 model for the precipitation variable when separated into precipitation intensity classes, as  
247 shown in Bellaire et al. (2011). The precipitation data for the two winters were combined in  
248 this analysis.

249 [ insert figure-4 here ]

250 Figure-4. Difference between observed and GEM precipitation data at Mt. Fidelity (BC)

251 separated by precipitation intensity classes.

252

253 Figure 4 reveals a stronger positive bias with increasing precipitation intensity/rate. The  
254 increasing bias is linear for the three models, although smaller biases are observed in GEM10  
255 and GEM15. This is probably due to the higher resolution of GEM-LAM vs the larger scale  
256 at which precipitation intensity varies. Furthermore, the questionable effectiveness of rain  
257 gauges installed on automatic weather stations in mountainous environments (especially in  
258 windy conditions) can partly explain this result (Schirmer, 2015). All three GEM  
259 precipitation datasets span two seasons and are compared to only one automatic weather  
260 station. An automatic weather station in a mountainous environment can sometimes be  
261 subject to isolated weather conditions and not be representative of the spatial extent  
262 represented by a pixel in simulated meteorological data, which can definitely cause a bias in  
263 the data validation. One should also note that the modelled data is available for certain  
264 isobaric levels only. The isobaric level used for this study site has an altitude difference of  
265 about 200 m with the real altitude of the study site, which provides an additional source of  
266 uncertainty.

267

268 Validation at the other study sites showed similar results to those for the Mt. Fidelity site: a  
269 good overall performance of the GEM-LAM model for the 2013-2014 winter, a lower  
270 performance for the 2014-2015 winter, and a systematic overestimation of high precipitation  
271 classes for all three meteorological models.

272

### 273 **3.2. SNOWPACK validation and sensitivity analysis**

#### 274 **3.2.1. Height of snow (HS)**

275 To perform the snow simulation validation, snow height (HS) was extracted from  
276 SNOWPACK outputs. Simulations were forced with each of the meteorological models and  
277 for each of the study sites. For Mount Fidelity, HS validation was performed by comparing  
278 daily simulations at 12:00PM. This time of the day was chosen to be consistent with the daily  
279 measurement taken at this study site by Parks Canada forecasters. For the RFCC study site,  
280 each time step (1h) was compared with the simulated data since the HS validation data were  
281 acquired by a station of automatic measurements at the same interval.

282 Figure-5 shows, for the 2013-2014 winter, the comparison between the simulated HS outputs  
283 extracted from SNOWPACK and the observed data at the Mt. Fidelity study site.

284 [ insert figure-5 here ]

285 Figure-5. Comparison between simulated and observed HS for the winter 2013-2014 at the  
286 Mt. Fidelity (BC) study site.

287

288 The general trend in Figure-5 shows a systematic underestimation of the simulated snow  
289 thickness for the in-situ data simulation. Simulations with GEM-LAM data show an  
290 overestimation of the HS early in the season (box 1) until the first week of December (box 2).  
291 Boxes 3 and 4 show an accumulation (increase of the HS values) in the observed data unlike  
292 melting episodes (decrease of the HS values) in the simulated data for all three models. This  
293 difference could be due to snow metamorphism uncertainties from SNOWPACK during  
294 these intervals. Overall, as expected, GEM15 and GEM10 are less accurate than GEM-LAM  
295 data with an approximate error of about 40% (see slope in the figure's table).

296 The same analysis was conducted at the RFCC site, and the results displayed in Figure-6 for  
297 the 2013-2014 winter.

298 [ insert figure-6 here ]

299 Figure-6. Comparison between simulated and observed HS for the winter 2013-2014 at the  
300 RFCC study site.

301 The general trend here shows an overestimation of HS throughout the winter for the GEM15  
302 and GEM10 simulations and an underestimation of the HS for in-situ and GEM-LAM  
303 simulations. From a statistical point of view, GEM10 and GEM15 simulations show the best  
304 slope and correlation coefficients and the lowest mean square errors. In-situ and GEM-LAM  
305 simulations are very similar and differences between observed data and GEM-LAM HS could  
306 be linked to poor simulations of precipitation events (box 1, 3 and 5) and poor modeling by  
307 SNOWPACK of a melting event (box 2 and 4). As mentioned in the meteorological data  
308 validation section, the GEM-LAM data acquired via remodeling from the CMC have a  
309 considerable gap with automatic weather station meteorological data. This difference is  
310 shown quite clearly in this analysis.

### 311 3.2.2. Structure

312 To assess the overall performance of SNOWPACK for the accurate simulation of the  
313 stratigraphy, mainly the presence of ice crusts, particular attention was paid to specific rain  
314 events and the associated response from the model. In this paper, an analysis of early season  
315 rain events for the 2014-2015 winter at the RFCC study site was performed. In-situ data were  
316 used to force SNOWPACK simulations and *InfoEx* entries as a validation tool for this  
317 analysis.

318 A total of four main rain events occurred and left significant melt-freeze crusts in the  
319 snowpack. These four events are described in the following table.

320 [insert Table-5 here]

321

322 The following figure shows the SNOWPACK output for grain types and bond size. As  
323 mentioned above, the simulation was performed with the in-situ meteorological data. This  
324 data has also been used to summarize the rainfall events in the table above.

325

326 [ insert figure-7 here ]

327 Figure-7. SNOWPACK output for grain types and bond size for RFCC study site (winter  
328 2014-2015).

329

330 The first rain event (arrow 1) took place early in the season when the snowpack was not very  
331 thick (less than 50 cm). This event took place before the Chic-Chocs avalanche operations  
332 commenced, which explains the absence of *InfoEx* data for this specific persistent weak layer.  
333 However, the succession of laminated crusts that resulted (thick red layer at the bottom of the  
334 snowpack in Figure-7) was easily observable during field campaigns throughout the season.  
335 The second rain event (arrow 2) resulted in a second major refreezing crust that was also  
336 mentioned in *InfoEx*, but was not yet identified as a persistent weak layer due to its position  
337 near the surface of the snowpack. The third event (arrow 3) made the vertical structure of the  
338 snow cover more complex. This significant rain event created a crust which, according to the  
339 spatial characteristics of observation sites, merged with the December 12 crust (arrow 2 in  
340 Figure-7). Figure-8 shows the snowpack structure at two observation sites as of January 17<sup>th</sup>  
341 2015. A difference is seen at the bottom of the vertical structure; the rain has percolated into  
342 the snowpack down to the ground at site 2, while it has not reached the first 20 centimetres at  
343 site 1.

344 [ insert figure-8 here ]

345 Figure-8. Difference in the snowpack structure between two study plots at RFCC study site  
346 on January 17<sup>th</sup> 2015.

347

348 For the same timeframe, the SNOWPACK simulation (Figure-9) shows a similar structure as  
349 site 2 (fusion between the December 12<sup>th</sup> and 24<sup>th</sup> crusts in striped red). The December 25<sup>th</sup>  
350 crust has been identified active on *InfoEx* by the Chic-Chocs avalanche operations from  
351 December 29<sup>th</sup> to January 25<sup>th</sup>. Some operations located further inland have, however,  
352 considered that layer ‘active’ until the beginning of March.

353 [ insert figure-9 here ]

354 Figure-9. SNOWPACK grain types output for January 17<sup>th</sup> 2015.

355

356 The last rain event occurred on January 19<sup>th</sup> (arrow 4 in Figure-7). Less substantial than the  
357 previous ones, it was still significant enough to be recorded by the operations on *InfoEx*. This  
358 event resulted in the formation of a melt-freeze crust, which was qualified as under  
359 development until February 2<sup>nd</sup>. However, avalanche operations changed its status to dormant  
360 soon after because of the good cohesion of the snow layers above and under it. This was not a  
361 priority to be monitored, unlike the December 24<sup>th</sup> crust, which was adjacent to poor  
362 cohesion layers (faceted layers, pale blue in Figure-7) and therefore produced instability in  
363 the snowpack. In addition, the cohesion between the grains of this crust was lower than the  
364 crusts discussed above, which also limited the importance that was assigned by the avalanche  
365 operations. The SNOWPACK simulation is consistent with these characteristics, showing a  
366 lower bond size for the January 19<sup>th</sup> crust compared to the two major crusts on December 16<sup>th</sup>  
367 and 24<sup>th</sup>.

368

#### 369 **4.0. Discussion and conclusion**

370 The project aimed to assess the potential of using SNOWPACK simulations to evaluate snow  
371 conditions in three different climatic contexts in Canada. The validation of modeled



372 meteorological data showed that the GEM-LAM datasets were generally more accurate,  
373 which was expected given their higher spatial resolution. The GEM-LAM data have also  
374 shown promising results in the assessment of SNOWPACK density and temperature profile  
375 outputs (not shown in this paper). Our results thus suggest using GEM-LAM when available  
376 for the following reasons: 1) better validation results for the meteorological forcing data  
377 when compared to reference station measurements, 2) more accurate snow property  
378 simulations and 3) higher spatial resolution.

379

380 The SNOWPACK simulations were generally in agreement with observations from the field  
381 campaigns. However, it was shown that SNOWPACK tends to overestimate grain size except  
382 for surface hoar (Langlois et al, 2012; Schweizer et al., 2006). Simulations have shown an  
383 underestimation of the surface hoar grain size, whose computation is managed independently  
384 from the module that regulates the size of other grain types (Lehning, 2002). Some studies  
385 are looking to analyze the sources of this specific bias (Horton, 2015). Furthermore, for sites  
386 with shallow snowpacks and cold temperatures, the model produced large biases. This  
387 problem can result in an incorrect modeling of the layers at the base of the snowpack, which  
388 are critical considering the shallow snowpacks. The melting and freezing cycles are generally  
389 well integrated into the model, as shown by the relatively accurate simulation of the different  
390 major crusts at the Chic-Chocs study site for the 2014-2015 winter. For the RFCC site, it was  
391 also shown that GEM-LAM did not produce the expected accurate snow depth simulations,  
392 most likely due to the effect of rain events throughout the season. This should be addressed in  
393 future studies, and is currently the topic of ongoing research at the Université de Sherbrooke.

394

395 Finally, physical characteristics of each study site and the quality of automatic weather  
396 station data greatly influenced each analysis. The evaluation of the overall structure of the

397 simulated snow cover using data from InfoEx allowed a comparison of the model outputs  
398 with data from an operational context and showed the performance of the model to accurately  
399 simulate persistent weak layers throughout a season. Work towards an operational  
400 implementation is underway, but uncertainties linked to metamorphism (see companion paper  
401 Madore et al., 2015) and rain should first be addressed. More precise validation techniques  
402 are also necessary to better assess the precision of the simulated stratigraphy and should be  
403 addressed in future projects.

404

#### 405 **5.0. Acknowledgements**

406 This research was funded through the National Search and Rescue Secretariat New Initiatives  
407 Fund (SAR-NIF), the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada  
408 (NSERC), the Canadian Foundation for Innovation (CFI), Parks Canada, Société des  
409 Établissements de Plein-air du Québec (SEPAQ) and the Centre d'Études Nordiques (CEN).  
410 The authors would like to thank the Meteorological Services of Canada for providing the  
411 GEM data. Thanks to Julie Leblanc, Simon Horton, Michael Shirmer, Deanna Anderson,  
412 Steve Blake and Kerry MacDonald for tremendous help in making field work possible.  
413 Finally, special thanks to Dominic Boucher (Avalanche Québec), Bruce Jamieson (University  
414 of Calgary) and Jeff Goodrich (Parks Canada) for logistical support and guidance throughout  
415 the project.

416

417

418 **6.0. References**

- 419 Bartelt, P., and Lehning M. (2002). A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche  
420 warning: Part I: numerical model. *Cold Regions Science and Technology*, 35, 123–145.
- 421 Bellaire S., Jamieson B., and Fierz, C. (2011). Forcing the snow-cover model SNOWPACK  
422 with forecasted weather data. *The Cryosphere*, 5, 1115–1125.
- 423 Bellaire, S., Schweizer, J., and Fierz, C. (2006). Predicting snow cover stability with the  
424 snow cover model SNOWPACK. *In Proceedings of International Snow Science*  
425 *Workshop, Tolluride, 1-6 October 2006*. 38–43.
- 426 Brun, BE., Martin, E., Simon, V., and Gendre, C. (1989). An energy and mass model of snow  
427 cover suitable for operational avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, 35, 333–342.
- 428 Canadian Avalanche Association (CAA). (2007). *Observation guidelines and recording*  
429 *standards for weather, snowpack and avalanches*. Canadian Avalanche Association,  
430 Revelstoke, Canada.
- 431 Commission de toponymie du Québec. (2012). Monts Chic-Chocs [online]. Retrieved from  
432 [http://www.toponymie.gouv.qc.ca/ct/ToposWeb/fiche.aspx?no\\_seq=13165](http://www.toponymie.gouv.qc.ca/ct/ToposWeb/fiche.aspx?no_seq=13165)
- 433 Desaulniers, F. (2015). *Les régimes avalancheux des Chic-Chocs, Québec, Gaspésie, dans un*  
434 *contexte de changements climatiques* (unpublished essay). Centre universitaire de  
435 formation en environnement et développement durable, Université de Sherbrooke,  
436 Sherbrooke.
- 437 Durand, Y., Giraud, G., Brun, E., Mérindol, L., and Martin, E. (1999). A computer-based  
438 system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting.  
439 *Journal of Glaciology*, 45, 469–484.
- 440 Gouvernement du Canada. (2014). Données numériques – Système à haute résolution de  
441 prévision déterministe (SHRPD) – Format GRIB2 [online]. Retrieved from  
442 [http://meteo.gc.ca/grib/grib2\\_HRDPS\\_HR\\_f.html](http://meteo.gc.ca/grib/grib2_HRDPS_HR_f.html)
- 443 Horton, S., Schirmer, M., and Jamieson, B. (2015). Meteorological, elevation, and slope  
444 effects on surface hoar formation. *The Cryosphere*, 9, 1847–1885.
- 445 Jamieson, B., and Stethem C. (2002). Snow Avalanche Hazards and Management in Canada :  
446 Challenges and Progress. *Natural Hazards*, 26, 35–53.
- 447 Jamieson, B., and Johnston, CD. (1992). Snowpack characteristics associated with avalanche  
448 accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 29, 862–866.
- 449 Langlois, A., Royer, A., Derksen, C., Montpetit, B., Dupont, F., and Goïta, K. (2012).  
450 Coupling the snow thermodynamic model SNOWPACK with the microwave emission  
451 model of layered snowpacks for subarctic and arctic snow water equivalent retrievals.  
452 *Water Resources Research*, 48(12). doi: :10.1029/2012WR012133.
- 453 Langlois, A., Brucker, L., Kohn, J., Royer, A., Derksen, C., Cliché, P., Picard, G., Fily, M.,  
454 and Willemet, JM. (2009). Regional Retrieval of Snow Water Equivalent (SWE) using  
455 Thermodynamic Snow Models in Québec, Canada. *Journal of Hydrometeorology*, 10,  
456 1447–1463.
- 457 Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., and Fierz, C. (2002a). A physical SNOWPACK model  
458 for the Swiss avalanche warning: Part III: Meteorological forcing, thin layer formation and  
459 evaluation. *Cold Regions Science and Technology*, 35, 169–184.

460 Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Fierz, C., and Satyawali, P. (2002b). A physical  
 461 SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning Part II. Snow microstructure. *Cold*  
 462 *Regions Science and Technology*, 35, 147–167.

463 Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., and Zimmerli, M. (1999). SNOWPACK model  
 464 calculations for avalanche warning based upon a new network of weather and snow  
 465 stations. *Cold Regions Science and Technology*, 30, 145–157.

466 Marmot Basin Ski Resort. (2014). Mountain Stats: Marmot Basin Ski Resort Homepage  
 467 [online]. Retrieved from [http://www.skimarmot.com/mountain/general-](http://www.skimarmot.com/mountain/general-information/mountain-stats)  
 468 [information/mountain-stats](http://www.skimarmot.com/mountain-general-information/mountain-stats)

469 Ouellet, F., Langlois, A., Johnson, C.-A., Richards, A. and Royer, A. (2015). *Spatialization*  
 470 *of the SNOWPACK Snow Model in the Canadian Arctic for Peary Caribou Winter Grazing*  
 471 *conditions assessment*. Manuscript submitted for publication.

472 Parcs Canada. (2009a). Climat et géologie – Parcs nationaux du Canada: Jasper [online].  
 473 Retrieved from <http://www.pc.gc.ca/fra/pn-np/ab/jasper/natcul/geo-climat.aspx>

474 Parcs Canada. (2009b). Citing online sources : Météo et climat – Parc national des Glaciers  
 475 [online]. Retrieved from <http://www.pc.gc.ca/fra/pn-np/bc/glacier/visit/visit4.aspx>

476 Schirmer, M., Schweizer, J., and Lehning, M. (2010). Statistical evaluation of local to  
 477 regional snowpack stability using simulated snow-cover data. *Cold Regions Science and*  
 478 *Technology*, 64, 110–118.

479 Schweizer, J., Kronholm, K., Jamieson, JB., and Birkeland, KW. (2008). Review of spatial  
 480 variability of snowpack properties and its importance for avalanche formation. *Cold*  
 481 *Regions Science and Technology*, 51, 253–272.

482 Schweizer, J., Bellaire, S., Fierz, C., Lehning, M., and Pielmeier, C. (2006). Evaluating and  
 483 improving the stability predictions of the snow cover model SNOWPACK. *Cold Regions*  
 484 *Science and Technology*, 46(1), 52–59.

485 Stethem, C., Jamieson, JB., and Schaerer, P. (2003). Snow avalanche hazard in Canada—a  
 486 review. *Natural Hazards*, 28, 487–515.

487 Schirmer, M., and Jamieson, B. (2015). Verification of analysed and forecasted winter  
 488 precipitation in complex terrain. *The Cryosphere*, 9, 587–601.

489

490 **Figure-1.** Reserve Faunique des Chic-Chocs - RFCC (QC) study site map.

491 **Figure-2.** Jasper National Park (AB) study site map.

492 **Figure-3.** Glacier National Park (BC) study site map.

493 **Figure-4.** Difference between observed and GEM precipitation data at Mt. Fidelity (BC)

494 separated by precipitation intensity classes.

495 **Figure-5.** Comparison between simulated and observed HS for the winter 2013-2014 at the

496 Mt. Fidelity (BC) study site.

497 **Figure-6.** Comparison between simulated and observed HS for the winter 2013-2014 at the

498 RFCC study site.

499 **Figure-7.** SNOWPACK output for grain types and bond size for RFCC study site (winter

500 2014-2015).

501 **Figure-8.** Difference in the snowpack structure between two study plots at RFCC study site

502 on January 17<sup>th</sup> 2015.

503 **Figure-9.** SNOWPACK grain types output at RFCC study site for January 17<sup>th</sup> 2015.

504

**Table-1.** Coordinates and altitude of validation meteorological stations

<i>Station name</i>	<i>Altitude (m)</i>	<i>Latitude (N)</i>	<i>Longitude (W)</i>
CQGI (RFCC)	270	48.95	-66.12
CAELA (RFCC)	675	48.93	-66.06
Fidelity (GNP)	1905	51.24	-117.7
Hermitt (GNP)	2000	51.33	-117.52
UdeS (JNP)	2100	52.79	-118.1

**Table-2.** Meteorological validation data for the three study sites.

<i>Variable</i>	<i>Units</i>	<i>RFCC</i>		<i>GNP</i>		<i>JNP</i>
		<i>CQGI</i>	<i>CAELA</i>	<i>Fidelity</i>	<i>Hermitt</i>	<i>UdeS</i>
Air temperature	K	X	X	X	X	X
Relative humidity	0-1	X	X	X	X	X
Incoming longwave	W·m <sup>-2</sup>		X	X		X
Emitted longwave	W·m <sup>-2</sup>					X
Incoming shortwave	W·m <sup>-2</sup>		X	X		X
Reflected shortwave	W·m <sup>-2</sup>					X
Surface temperature	K					X
Soil temperature	K					X
Wind speed	m·s <sup>-1</sup>	X	X		X	X
Wind direction	°	X	X		X	X
Precipitation	mm	X	X	X	X	
Snow depth	cm	X	X	X	X	X

**Table-3.** Mt. Fidelity forecasted weather data validation (2013-2014)

Mt. Fidelity forecasted weather data validation (2013-2014)												
	GEM10				GEM15				GEMLAM			
	<i>m</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>RMSE</i>	<i>m</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>RMSE</i>	<i>m</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>RMSE</i>
<i>T</i> <sup>°</sup>	<u>1.01</u>	<u>-0.80</u>	0.95	1.97	1.01	-1.11	<u>0.96</u>	1.96	0.92	21.69	0.95	<u>1.80</u>
<i>RH</i>	0.75	<u>8.05</u>	0.62	19.01	0.75	8.51	0.62	18.85	<u>1.00</u>	-13.68	<u>0.74</u>	<u>18.22</u>
<i>ISWR</i>	0.44	78.19	0.53	158.43	0.44	<u>76.94</u>	0.53	157.86	<u>0.56</u>	96.17	<u>0.58</u>	<u>150.50</u>
<i>ILWR</i>	0.61	85.12	0.69	37.52	0.62	84.68	0.70	37.73	<u>0.77</u>	53.18	<u>0.73</u>	<u>37.14</u>
<i>Wspeed</i>	0.24	1.69	0.46	2.87	0.21	<u>1.63</u>	0.44	2.97	<u>0.30</u>	2.21	<u>0.58</u>	<u>2.38</u>
<i>PSUM</i>	0.33	<u>0.10</u>	0.51	0.46	0.34	0.11	<u>0.51</u>	<u>0.46</u>	<u>0.65</u>	0.12	0.48	0.64



**Table-4.** Mt.Fidelity forecasted weather data validation (2014-2015)

Mt. Fidelity forecasted weather data validation (2014-2015)												
	GEM10				GEM15				GEMLAM			
	<i>m</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>RMSE</i>	<i>m</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>RMSE</i>	<i>m</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>RMSE</i>
<i>T</i> <sup>o</sup>	0,90	26,12	0,94	1,64	<u>0,91</u>	<u>25,38</u>	0,94	<u>1,62</u>	0,84	43,69	0,91	2,08
<i>RH</i>	0,75	0,15	0,71	0,14	0,73	0,16	0,71	0,14	<u>0,86</u>	<u>0,04</u>	<u>0,73</u>	0,15
<i>ISWR</i>	<u>0,11</u>	<u>148,82</u>	<u>0,13</u>	<u>216,64</u>	0,11	153,36	0,13	218,57	-	-	-	-
<i>ILWR</i>	0,61	97,18	<u>0,77</u>	<u>32,55</u>	0,61	<u>97,00</u>	0,77	<u>32,48</u>	-	-	-	-
<i>Wspeed</i>	0,17	1,84	<u>0,31</u>	<u>2,76</u>	0,15	<u>1,77</u>	0,30	2,83	<u>0,18</u>	5,26	0,13	4,01
<i>PSUM</i>	0,25	<u>0,08</u>	<u>0,58</u>	<u>0,50</u>	0,25	0,09	0,54	0,50	<u>0,43</u>	0,12	0,34	0,77

**Table-5.** Rain and warm temperature events at RFCC study site for 2014-2015 winter

Start date	End date	Mean precipitation intensity (mm/h)	Max precipitation (mm/h)	Total precipitation (mm)	Mean T° (°C)	Max T° (°C)
24-11-2014 12:00	26-11-2014 03:00	0,48	4,50	19,10	2,09	6,73
12-12-2014 11:00	13-12-2014 21:00	0,42	4,10	14,60	1,56	4,83
24-12-2014 21:00	25-12-2014 19:00	1,67	6,30	38,30	2,72	7,09
19-01-2015 07:00	20-01-2015 02:00	0,38	1,30	7,60	1,04	1,71

Figure 1

[Click here to download Figure Figure1.jpg](#)

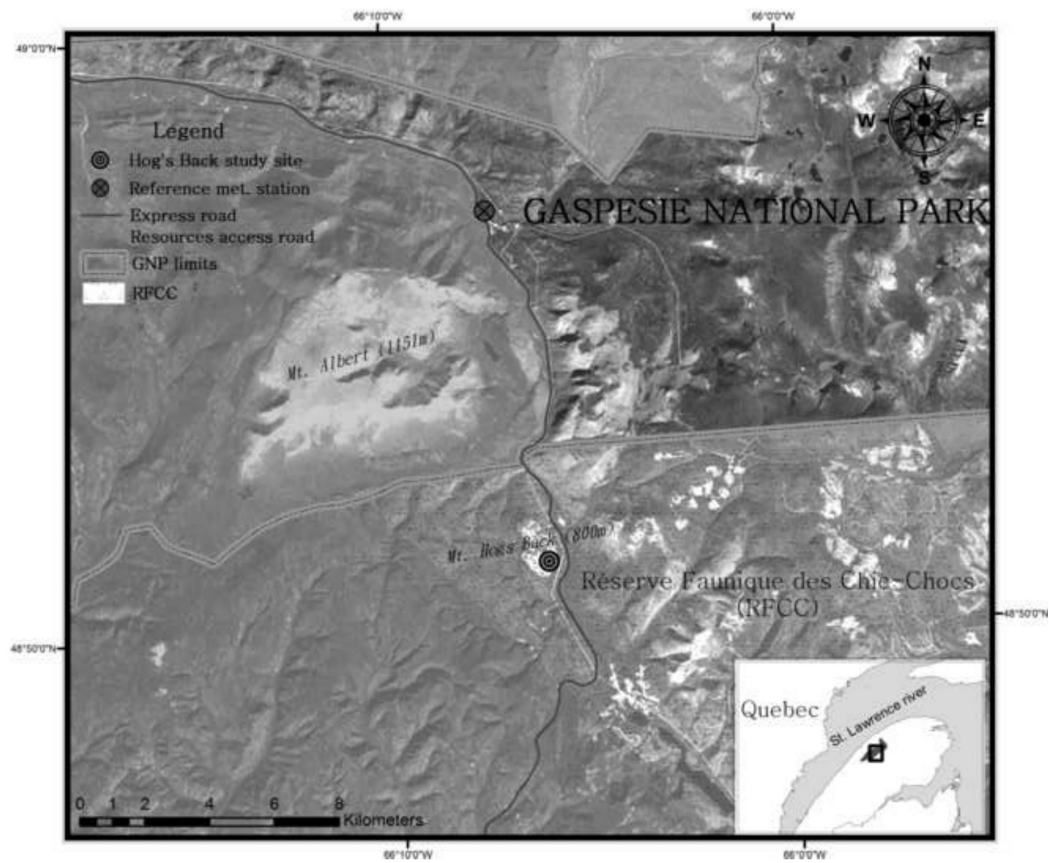


Figure 2

[Click here to download Figure Figure2.jpg](#)

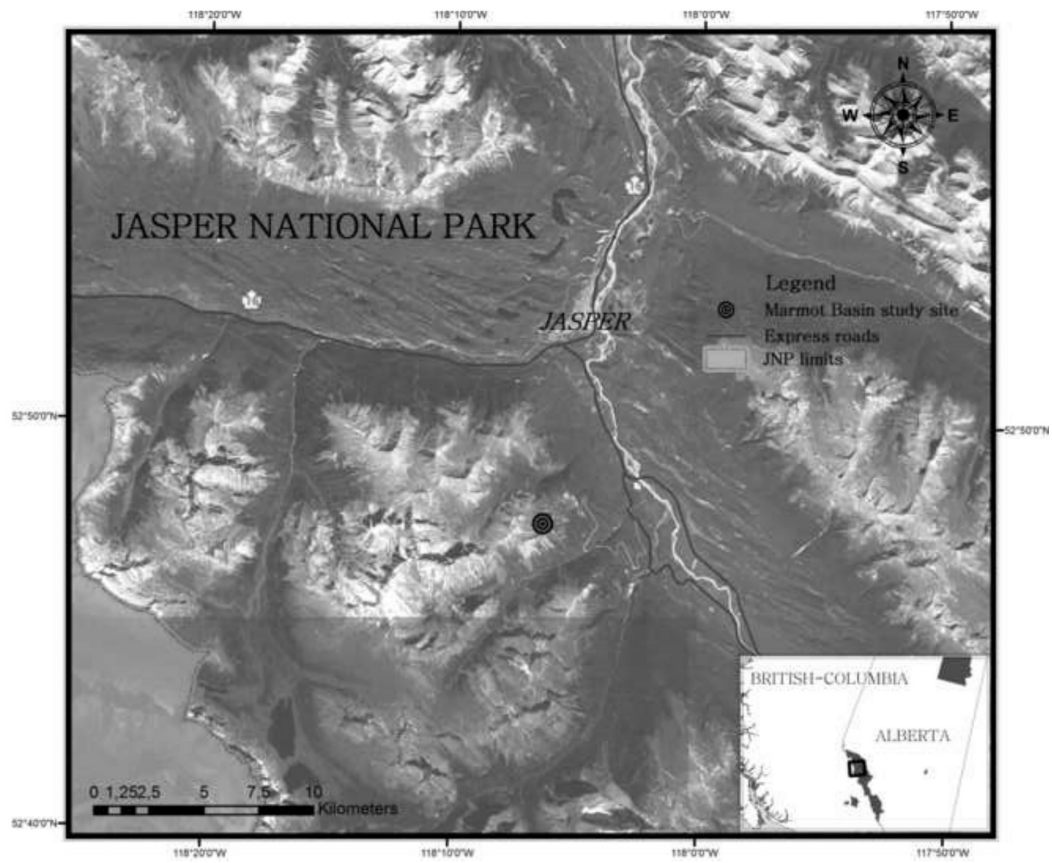


Figure 3

[Click here to download Figure Figure3..jpg](#)

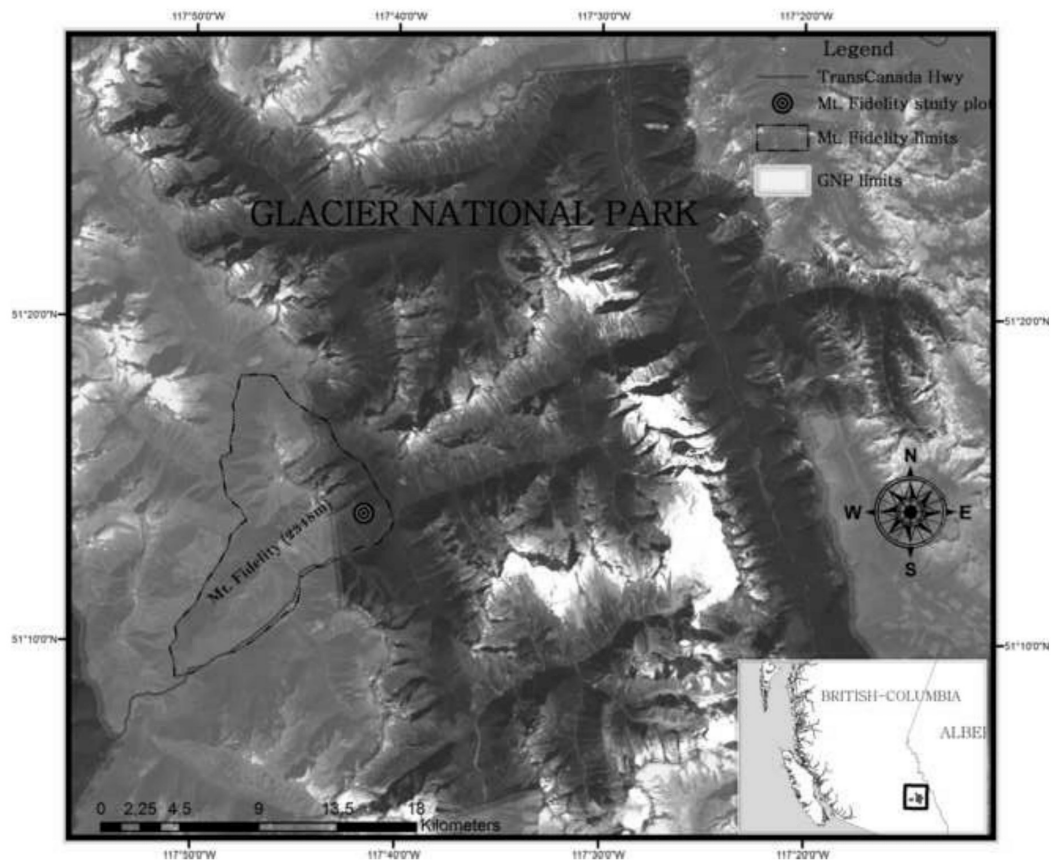


Figure 4

[Click here to download Figure Figure4.jpg](#)

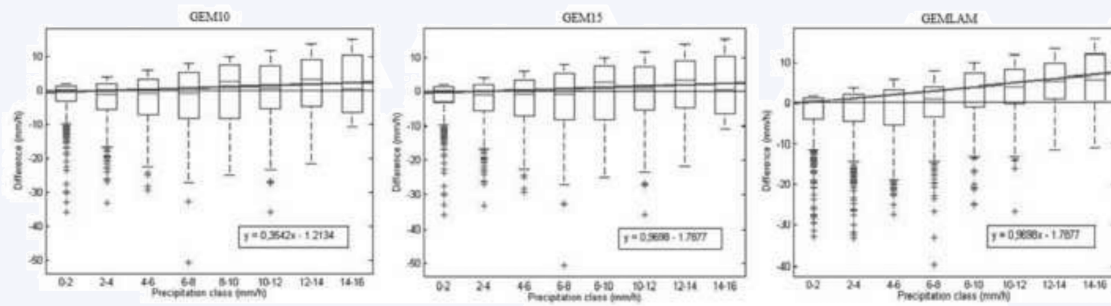


Figure 5

[Click here to download Figure Figure5.jpg](#)

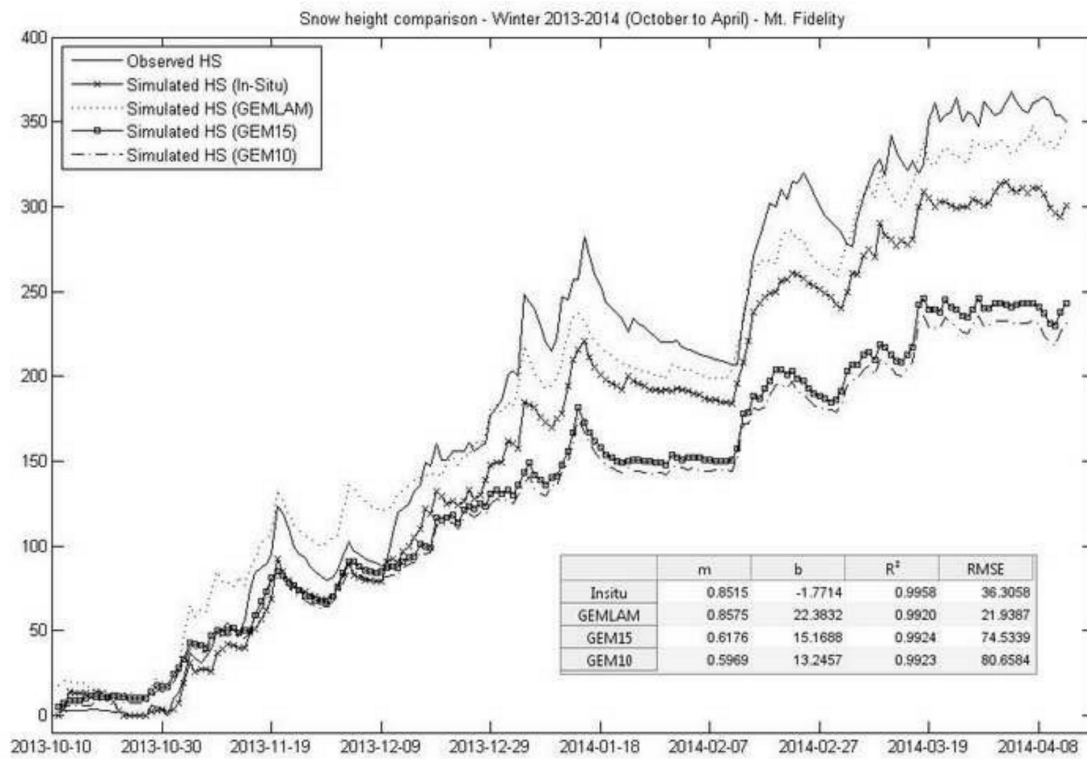


Figure 6

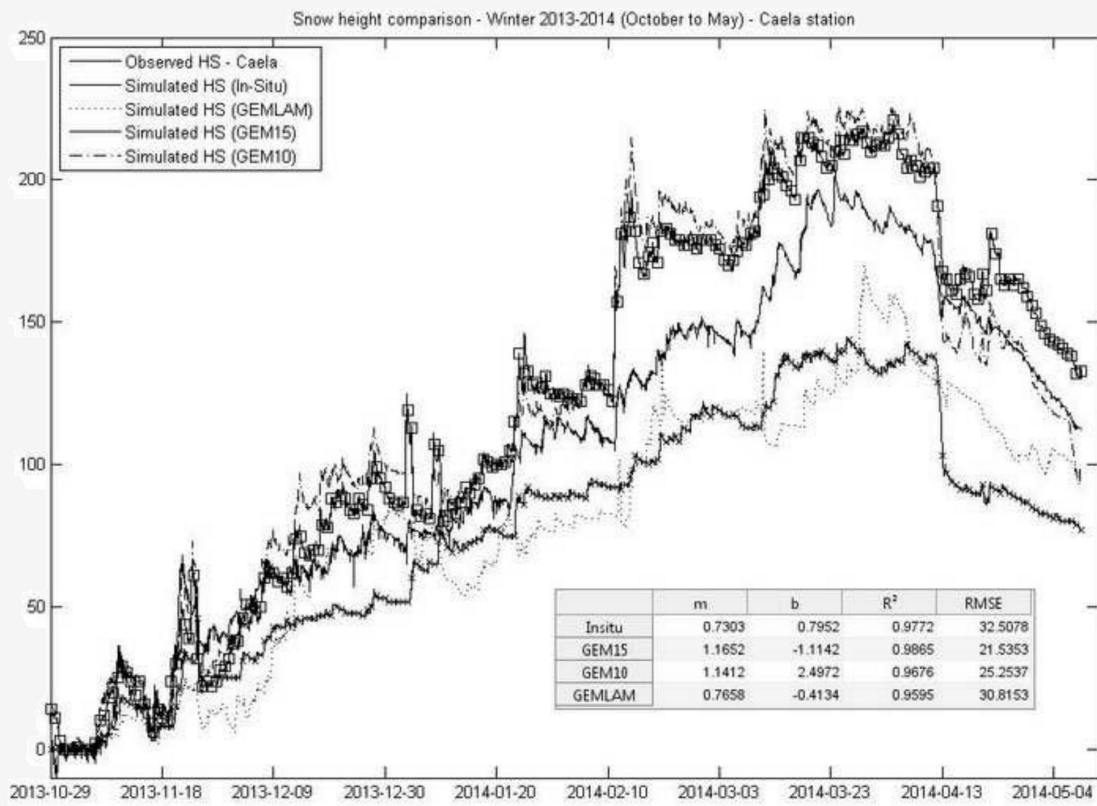
[Click here to download Figure Figure6.jpg](#)



Figure 7

[Click here to download Figure Figure7.jpg](#)

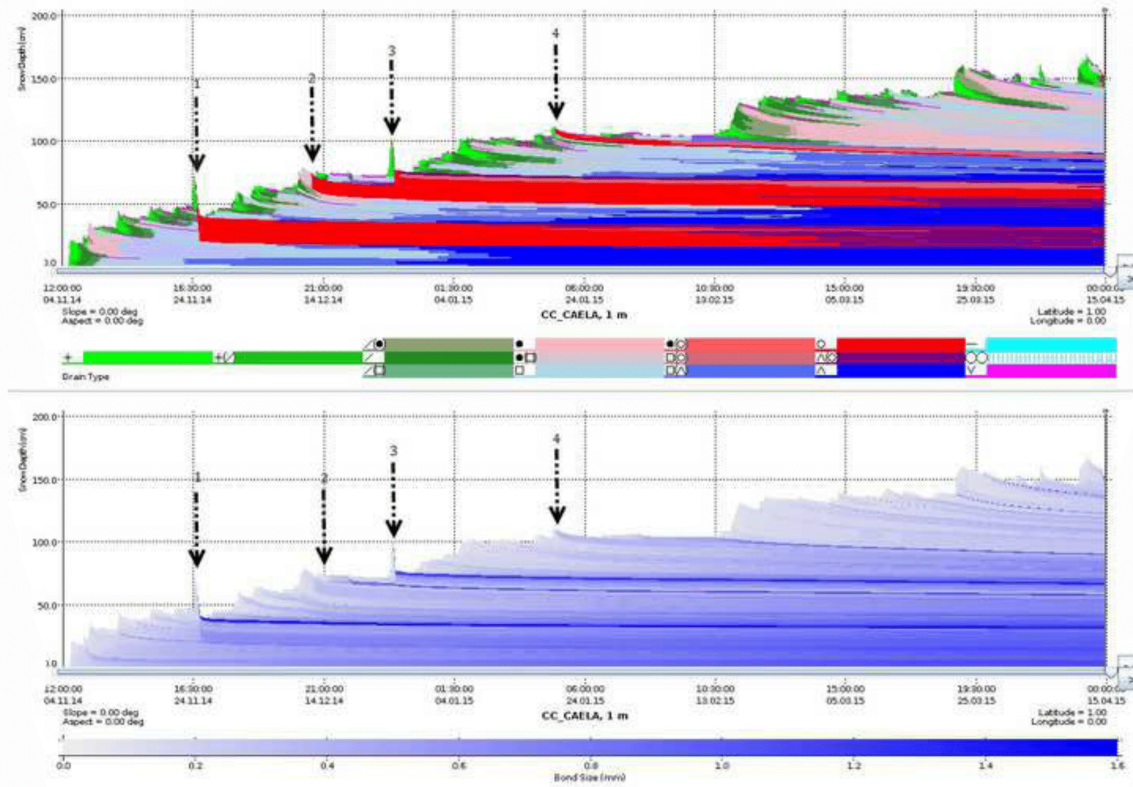


Figure 8

[Click here to download Figure Figure8.jpg](#)

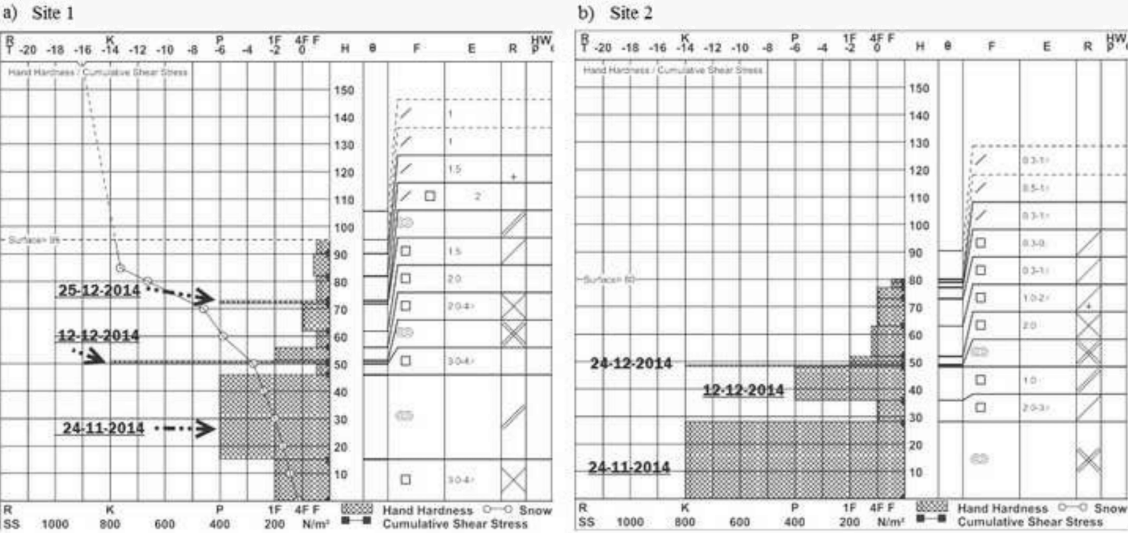


Figure 9

[Click here to download Figure Figure9.jpg](#)

